

PÚBLICO

DOCUMENTO DEL BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO

ECUADOR

PROYECTO HIDROELÉCTRICO COCA-CODO SINCLAIR

(EC0123)

**ESTUDIO VULCANOLÓGICO DE
“EL REVENTADOR”**

1988

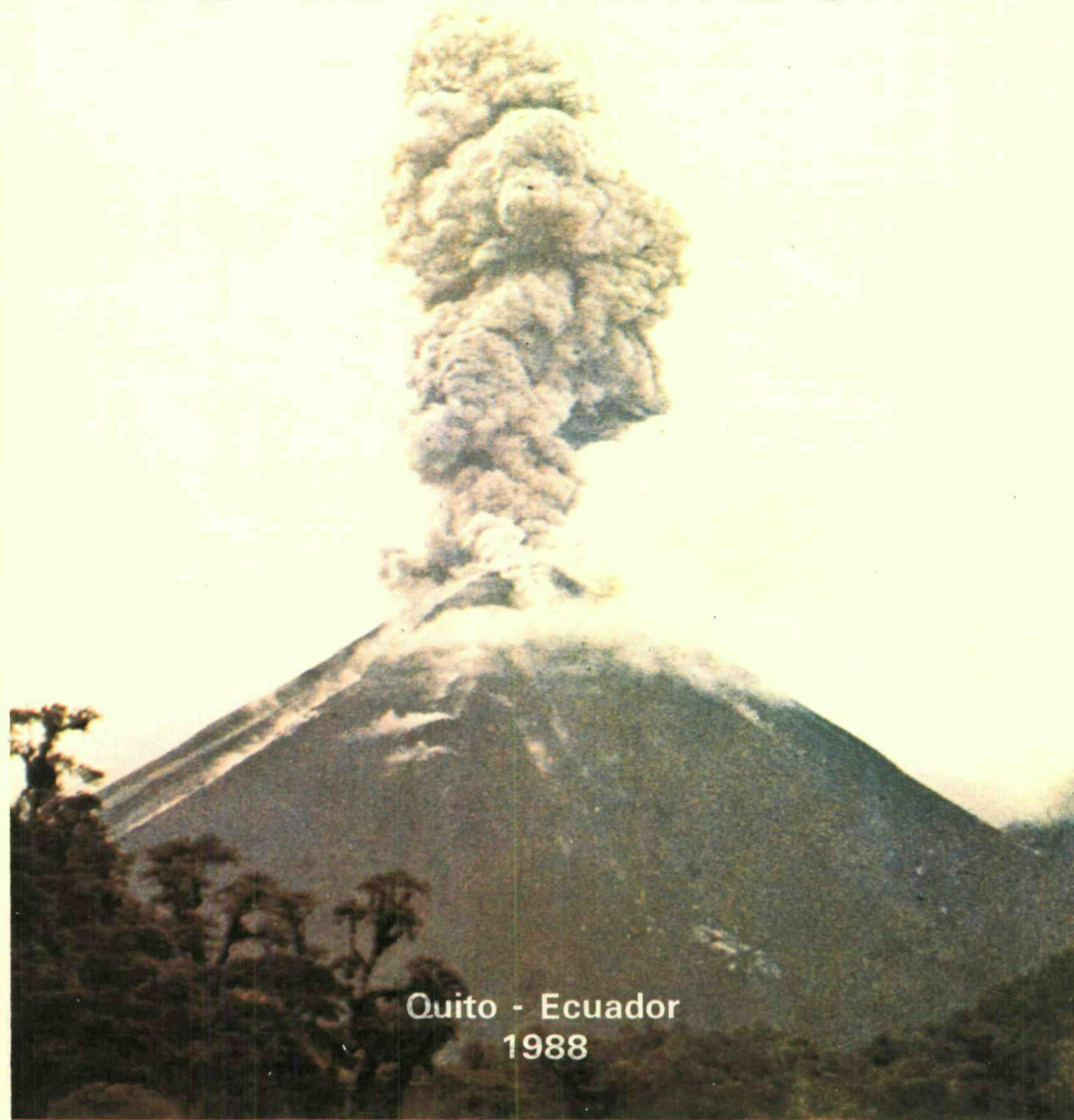


INECEL

REPUBLICA DEL ECUADOR
MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS

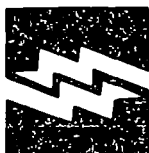
INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACION

ESTUDIO VULCANOLOGICO DE "EL REVENTADOR"



Quito - Ecuador
1988

ESTUDIOS REALIZADOS POR INECEL
Y LA ASOCIACION DE FIRMAS CONSULTORAS
DEL PROYECTO HIDROELECTRICO COCA-CODO SINCLAIR
ELECTROCONSULT - TRACTIONEL - RODIO
ASTEC - INELIN - INGECONSULT - CAMINOS Y CANALES



INECEL

**REPUBLICA DEL ECUADOR
MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS**

INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACION

ESTUDIO VULCANOLOGICO DE "EL REVENTADOR"

**Quito - Ecuador
1988**

**ESTUDIOS REALIZADOS POR INECEL
Y LA ASOCIACION DE FIRMAS CONSULTORAS
DEL PROYECTO HIDROELECTRICO COCA-CODO SINCLAIR
ELECTROCONSULT - TRACTIONEL - RODIO
ASTEC - INELIN - INGECONSULT - CAMINOS Y CANALES**

FOTO: ALEXANDER HIRTZ - 1976



ERUPCION DEL VOLCAN
"EL REVENTADOR", AÑO 1976
IMPRESION: INSTITUTO GEOGRAFICO MILITAR
AÑO: OCTUBRE 1988

INDICE

| | |
|--|-----|
| AGRADECIMIENTOS | 7 |
| 1. INTRODUCCION | 8 |
| 2. MARCO GEOLOGICO REGIONAL | 11 |
| 2.1 Unidades geológicas principales en el área del volcán El Reventador | 11 |
| 2.2 Tectónica | 13 |
| 2.3 Reconstrucción paleogeográfica y geodinámica | 13 |
| 3. ZONIFICACION ESTRUCTURAL DEL AREA ESTUDIADA | 16 |
| 4. GEOLOGIA DEL COMPLEJO VOLCANICO EL REVENTADOR | 20 |
| 4.1 Los edificios volcánicos | 21 |
| 4.2 Las avalanchas de escombros | 24 |
| 4.3 Dataciones absolutas | 25 |
| 5. TECTONICA LOCAL | 29 |
| 6. PETROGRAFIA | 32 |
| 7. GEOQUIMICA | 47 |
| 7.1 Composición química de los productos volcánicos | 48 |
| 7.2 Condiciones de cristalizaciones de los magmas | 58 |
| 8. MODELIZACION DEL SISTEMA ERUPTIVO DEL CONO ACTUAL | 65 |
| 9. EVALUACION DEL RIESGO VOLCANICO | 72 |
| 9.1 Actividad histórica del volcán El Reventador | 72 |
| 9.2 Peligros relacionados con la actividad efusiva | 73 |
| 9.3 Peligros relacionados con la actividad explosiva | 75 |
| 10. GASES FUMAROLICOS Y MANIFESTACIONES TERMALES | 85 |
| 11. MONITOREO DEL VOLCAN EL REVENTADOR | 94 |
| 12. SINTESIS DE LOS RESULTADOS | 97 |
| 13. BIBLIOGRAFIA | 102 |
| 14. DOCUMENTACION FOTOGRAFICA | 105 |
| 15. PLANOS | 117 |

| CUADROS | | PAGINA |
|---------|--|--------|
|---------|--|--------|

| | | |
|------|---|-------|
| 4/1 | Resultados de las determinaciones radiométricas K/Ar | 27 |
| 4/2 | Resultados de las determinaciones radiométricas ¹⁴ C | 28 |
| 6/1 | Petrografía del Complejo Volcánico Basal (CVB) | 42 |
| 6/2 | Petrografía del Volcán Peloreventador (VPR) | 43 |
| 6/3 | Petrografía del Volcán El Reventador (VER) | 44 |
| 6/4 | Análisis de minerales pertenecientes a rocas del Complejo Volcánico El Reventador | 45-46 |
| 7/1 | Análisis químico de rocas del Complejo Volcánico El Reventador Parte 1: Complejo Volcánico Basal (CVB) | 49 |
| 7/1 | Análisis químico de rocas del Complejo Volcánico El Reventador Parte 2: Volcán Paleoreventador (VPR) | 50 |
| 7/1 | Análisis químico de rocas del Complejo Volcánico El Reventador Parte 3: Volcán El Reventador como actual (VER) | 51 |
| 7/2 | Temperaturas de cristalización estimadas por medio del geotermómetro olivino-líquido magmático | 58 |
| 7/3 | Temperaturas de cristalización estimadas por medio del geotermómetro a dos piroxenos Presiones de agua y total | 59 |
| 7/4 | Contenido de agua en el magma | 63 |
| 7/5 | Viscosidad y densidad del magma | 63 |
| 8/1 | Secuencia de emisión y volumen de las coladas lávicas del Volcán El Reventador (VER) | 65 |
| 8/2 | Modelo de cristalización fraccionada para los productos más recientes del Volcán El Reventador (VER) | 68 |
| 8/3 | Modelo del sistema de alimentación del Volcán El Reventador (VER) | 71 |
| 9/1 | Velocidad de los vientos | 77 |
| 9/2 | Distribución porcentual de la masa piroclástica | 77 |
| 9/3 | Concentración sobre el suelo de los depósitos piroclásticos de caída | 78 |
| 9/4 | Inclinación del cono de energía | 79 |
| 9/5 | Inclinación del cono de energía adoptado en la simulación | 80 |
| 10/1 | Volcán El Reventador Análisis químicos de aguas y gases Cuadro resumen de los resultados Análisis de gases | 86 |
| 10/2 | Volcán El Reventador Análisis químicos de aguas y gases Cuadro resumen de los resultados Análisis de aguas | 87 |

| FIGURAS | PAGINA |
|---|--------|
| 1 Esquema geológico del noreste del Ecuador | 11 |
| 2 Esquema estructural del área estudiada | 16 |
| 3 Zonificación estructural del área estudiada | 17 |
| 4 Esquema de las principales etapas de evolución del Complejo Volcánico El Reventador. Planos de los contactos tectónicos y perfiles evolutivos | 20 |
| 5 Esquema geológico del área del Complejo Volcánico El Reventador | 21 |
| 6 Nomenclatura de las series orogenéticas Diagrama clasificativo K ₂ O/SiO ₂ | 32 |
| 7 Andesitas del Complejo Volcánico Basal Composición química de los fenocristales | 34 |
| 8 Lavas del Complejo Volcánico Basal Diagrama de persistencia de las fases en fenocristales | 35 |
| 9 Basaltos del Volcán Paleoreventador Composición química de los fenocristales | 36 |
| 10 Andesitas del Volcán Paleoreventador Composición química de los fenocristales | 37 |
| 11 Lavas del Volcán Paleoreventador Diagrama de persistencia de las fases en fenocristales | 38 |
| 12 Basaltos del Volcán El Reventador Composición química de los fenocristales | 39 |
| 13 Andesitas del Volcán El Reventador Composición química de los fenocristales | 40 |
| 14 Lavas del Volcán el Reventador Diagrama de persistencia de las fases en fenocristales | 41 |
| 15 Lavas del Complejo Volcánico El Reventador Diagrama resumen de persistencia de las fases en fenocristales | 41 |
| 16 Esquema de ubicación de las muestras | 47 |
| 17 Lavas del Complejo Volcánico El Reventador Diagrama K ₂ O/SiO ₂ | 48 |
| 18 Lavas del Complejo Volcánico El Reventador Diagrama Alkali/SiO ₂ | 52 |
| 19 Lavas del Complejo Volcánico El Reventador Diagramas de variación de los elementos mayores versus SiO ₂ | 53 |
| 20 Lavas del Complejo Volcánico El Reventador Diagrama Alkali/Hierro/Magnesio (A/H/M) | 54 |
| 21 Lavas del Complejo Volcánico Basal Diagramas de variación de los elementos mayores versus SiO ₂ | 55 |
| 22 Lavas del Volcán Paleoreventador Diagramas de variación de los elementos mayores versus SiO ₂ | 56 |
| 23 Lavas del Volcán El Reventador Diagramas de variación de los elementos mayores versus SiO ₂ | 57 |

| FIGURAS | PAGINA |
|---|------------------|
| 24 Basaltos VPR y andesitas VER Diagrama presión-temperatura para la reacción $\text{CaAl}_2\text{SiO}_6 + \text{SiO}_2 = \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ | 60 |
| 25 Lavas del Complejo Volcánico El Reventador Diagrama pseudoternario diópsido /plagioclasa/cuarzo + ortoclasa | 61 |
| 26 Lavas del Complejo Volcánico El Reventador Diagrama pseudoternario diopsido/olivino/cuarzo + ortoclasa | 62 |
| 27 Lava del Volcán El Reventador Variación de la viscosidad en función de la temperatura | 64 |
| 28 Lavas del Volcán El Reventador (VER) Variación del índice de diferenciación (I.D.) | 66 |
| 29 Lavas del Volcán El Reventador (VER) Diagrama $\text{K}_2\text{O}/\text{MgO}$ | 66 |
| 30 Lavas del Volcán El Reventador (VER) Diagrama $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ | 67 |
| 31 Volcán El Reventador (VER) Modelo de diferenciación por cristalización fraccionada | 67 |
| 32 Volcán El Reventador (VER) Esquema del modelo de alimentación | 69 |
| 33 Volcán El Reventador Simulación de la caída de los productos piroclásticos | 76 |
| 34 Altura de la columna eruptiva Caso A y B | 81 |
| 35 Altura de la columna eruptiva Caso C y D | 82 |
| 36 Gases fumarólicos del Volcán El Reventador (VER) Diagrama triangular $\text{CO}_2/\text{N}_2/(\text{O}_2+\text{Ar})$ | 89 |
| 37 Aguas del Volcán El Reventador (VER) | 91 |
| 38 Aguas del Volcán El Reventador (VER) Diagrama calcio/sodio y potasio/sodio | 91 |
| 39 Aguas del Volcán El Reventador (VER) Diagrama boro/cloro | 92 |
| 40 Aguas del Volcán El Reventador (VER) Diagrama boro/salinidad total (TDS) | 92 |
| FOTOGRAFIAS | 105 - 116 |
| 20 fotografías | |
| PLANOS | 117 |
| Estudio Vulcanológico de "El Reventador" Mapa Geológico del cráter | |
| Estudio Vulcanológico de "El Reventador" Cortes geológicos | |
| Carta geológica del Volcán "El Reventador", escala 1:50.000 | |

AGRADECIMIENTOS

Para la realización de estos estudios se contó con el financiamiento del Instituto Ecuatoriano de Electrificación, INECEL, del Banco Interamericano de Desarrollo, BID, y del Fondo Nacional de Preinversión, FONAPRE.

El apoyo permanente brindado por el Gerente General de INECEL, Ing. Hans Collin, así como por parte del Ing. Marco Karolis, Director Ejecutivo de Ingeniería y Construcción, fue factor decisivo para la realización de este estudio.

Bajo la dirección del Ing. L. Cepeda, desde la Superintendencia de Ingeniería de INECEL y del Ing. J. Salvador, Director del Proyecto, y con la colaboración de la División de Ingeniería Geotécnica a cargo del Ing. I. Núñez, fueron definidas y coordinadas las actividades relacionadas a las campañas geovulcanológicas y a los trabajos de gabinete.

Para la realización de todas las actividades científicas se contó con la participación y supervisión directa de los Consultores: Profesores F. Barberi y F. Innocenti, catedráticos de la Universidad de Pisa, Italia y del Profesor G. Pasquaré, catedrático de la Universidad de Milán, Italia.

Los trabajos geovulcanológicos de campo y los muestreos estuvieron a cargo del Geólogo de INECEL Ing. W. Balseca, quien en colaboración del Ing. J. Robles desde hace algunos años llevaron a cabo el levantamiento geológico del área del Proyecto, y de los Ingenieros E. Aguilera, M. Ferraris, P. Langlois y A. Masini, pertenecientes a la Asociación de Firms Consultoras ELECTRO-CONSULT-TRACTIONEL-RODIO/ASTEC-INELIN-INGECONSULT-CAMINOS Y CANALES.

Además, otros Geólogos de INECEL realizaron las siguientes actividades: el Ing. E. Almeida en la revisión y evaluación de los trabajos de campo; el Ing. M. Torres efectuó la revisión de la información geológica, y el Ing. G. Sandoval colaboró en el levantamiento y muestreo de las emisiones fumarólicas y de las aguas termales.

La participación y dedicación de todos estos profesionales, a los cuales se expresan los más sinceros agradecimientos, hicieron posible estructurar esta publicación que, evidentemente, no pretende agotar todos los temas relacionados con la historia evolutiva del volcán El Reventador, pero sí contribuir al progreso futuro de los conocimientos científicos nacionales, presentando un modelo de investigaciones y estudios en el área de la Vulcanología.

1. INTRODUCCION

Durante algunos siglos, después de la conquista española, la existencia de un volcán activo al este de la Cordillera Real, en la impenetrable selva amazónica ecuatoriana, originó comentarios imprecisos y fantásticos.

Solamente en las últimas décadas, después de la aventurada exploración de J. H. Sinclair (1929), se realizaron reconocimientos oficiales y se obtuvieron descripciones confiables del "misterioso" volcán El Reventador, que con sus 3.562 m de altitud, domina la región comprendida entre los ríos Coca, Salado y Dué, en la provincia del Napo.

La construcción de la nueva carretera entre Baeza y Lago Agrio y del Oleoducto Trans-ecuatoriano facilitó, a partir del año 1970, el acceso hasta la ladera oriental del volcán.

El área del Proyecto Hidroeléctrico Coca-Codo Sinclair está ubicada en la vertiente atlántica de la Cordillera Real, al norte de la región oriental del Ecuador. Con este Proyecto se aprovecharán los recursos hidroenergéticos de la cuenca de los ríos Quijos y Coca que pertenece al curso superior del sistema fluvial Quijos-Coca-Napo-Maráñón-Amazonas.

La zona de cierre seleccionada se encuentra inmediatamente aguas abajo de la confluencia de los ríos Quijos y Salado, a partir de la cual el río toma el nombre de Coca y está en un sitio próximo al gran edificio volcánico de El Reventador.

El esquema general del Proyecto prevé la construcción de una presa derivadora a filo de agua y la excavación de un túnel de 24.9 km. en la margen derecha para llevar el agua a un embalse compensador en el sector del Codo Sinclair, como se denomina una curva cerrada del río Coca que se encuentra a unos 59,5 km. aguas abajo de la zona de cierre siguiendo el curso del río. Embalse desde el cual, con otro tramo de túnel y con una tubería de presión, el agua sería llevada a una casa de máquinas en subterráneo aprovechando un desnivel de 650 m.

Algunas de estas obras se ubicarían en zonas de posible influencia del volcán por lo que, en el ámbito del Estudio de Factibilidad del Proyecto se ha previsto la realización de investigaciones de campo y análisis de laboratorio tendientes a evaluar el riesgo volcánico y su posible impacto sobre el Proyecto.

Pese a ser uno de los volcanes más activos del Ecuador, El Reventador no había sido hasta ahora objeto de estudios sistemáticos y detallados. Descripciones cualitativas de las erupciones más recientes fueron proporcionadas por Hantke y Parodi (1966) y Hall (1977); su última erupción (enero-abril de 1976) es la única descrita con algún grado de detalle.

Los riesgos potenciales relacionados con la actividad del volcán fueron tratados preliminarmente en el informe de Prefactibilidad del Proyecto Hidroeléctrico Coca, INECCEL 1977, en el mismo que se considera que el riesgo más elevado del volcán está relacionado con los flujos de lodo que podrían afectar a la cuenca del río Mállo, la zona del campamento de INECCEL y el valle del río Coca aguas abajo de la cascada de San Rafael. Esta última zona, siempre según el mismo informe, sería vulnerable también a la acción de las coladas de lava.

En los últimos años, los Estudios de Inventario del Recurso Hidroenergético de la cuenca del río Coca y de Factibilidad del Proyecto Hidroeléctrico Coca-Codo Sinclair han demostrado la necesidad de un conocimiento exhaustivo de la historia evolutiva de El Reventador y una evaluación de los riesgos volcánicos relacionados a las diferentes actividades de este estratovolcán, considerado uno de los más activos del Ecuador y del mundo.

En 1986, el personal del Proyecto Geotérmico de INECCEL realizó un estudio vulcanológico de El Reventador (Almeida y Cruz, 1986) que modifica profundamente los conceptos que tenían sobre la estructura y evolución del volcán. Su principal aporte es el reconocimiento de un gigantesco deslizamiento en masa que originó el anfiteatro existente alrededor del cono actual del volcán, el que anteriormente había sido interpretado como una caldera. En el estudio de Almeida y Cruz citado, se indica también que los lahares (o flujos de lodo) constituyen el principal riesgo de El Reventador.

En el año de 1986 se celebra el contrato entre el Instituto Ecuatoriano de Electrificación, INECCEL, y la Asociación de Firms Consultoras formada por las compañías extranjeras ELECTROCONSULT, TRACTIONEL, RODIO, y las nacionales ASTEC, INELIN, INGECONSULT y CAMINOS Y CANALES, para el estudio de Factibilidad del Proyecto Hidroeléctrico Coca-Codo Sinclair, dentro del cual se programaron una serie de trabajos de campo y levantamientos aerofotográficos de todo el sector del volcán y del área interesada por las obras del Proyecto, además de ensayos de laboratorio para el reconocimiento y definición de los principales parámetros químicos y petrográficos, para la evaluación de los riesgos relacionados con este volcán.

Estos trabajos comprendieron las siguientes actividades:

- Estudio de la documentación existente.
- Estudio de fotografías aéreas.
- Trabajos de campo: levantamiento geológico a escala 1:25.000; estudios estratigráficos y tectónicos; muestreo de rocas volcánicas, aguas termales, gases fumarólicos y restos vegetales con fines de estudios petrográficos, químicos y dataciones radiométricas correspondientes.
- Trabajos de laboratorio y gabinete: estudios petrográficos en lámina delgada; análisis de los principales minerales por microsonda electrónica; análisis radiométricos (K-Ar y ^{14}C); cálculos petrológicos y geoquímicos; estimación de las condiciones de cristalización de los magmas; formulación de un modelo para la alimentación del volcán; digitalización de la topografía del edificio volcánico y simulación mediante un modelo numérico de las erupciones explosivas del volcán.

El día 5 de marzo de 1987, durante la ejecución de los estudios, un fuerte terremoto sacudió a la región nororiental del Ecuador y, particularmente al área del Proyecto, provocando la reactivación de muchos lineamientos tectónicos y la formación de impresionantes fenómenos de deslizamiento en masa, flujos de lodo y aluviones. Los efectos del sismo confirmaron la naturaleza activa de algunas fallas de la zona de El Reventador que habían sido previamente identificadas como tales en base a los estudios geológicos realizados en la primera etapa de los estudios.

Este evento motivó que algunas de las actividades de investigación del Proyecto fueran reprogramadas y, en particular, se decidió rediseñar la geometría de la futura red microsísmica, así como asignar mayor énfasis a los estudios de neotectónica regional.

En resumen, los objetivos del estudio vulcanológico fueron los siguientes:

- Identificar todos los tipos de fenómenos eruptivos que pueden ocurrir en relación con la actividad del volcán El Reventador.
- Proporcionar una evaluación del posible riesgo de cada uno de estos fenómenos sobre el área del Proyecto Hidroeléctrico Coca-Codo Sinclair.
- Sugerir las eventuales medidas a adoptarse para la mitigación de estos riesgos, particularmente en cuanto al monitoreo geofísico y geoquímico del volcán.

En esta publicación se presentan las metodologías empleadas en las diferentes disciplinas de la Vulcanología y los resultados obtenidos que constituyen un notable progreso en el grado de conocimiento del volcán El Reventador.

2. MARCO GEOLOGICO REGIONAL

2.1 Unidades geológicas principales en el área del volcán El Reventador

El complejo volcánico de El Reventador es uno de los centros más internos con respecto al arco magmático ecuatoriano, pues se encuentra emplazado en la zona subandina a corta distancia de la franja de los cabalgamientos de la Cordillera Real. Esto hace que el volcán se encuentre ubicado en una zona geológicamente muy compleja de los Andes del Ecuador, sujeta a grandes movimientos tectónicos compresivos debidos a la convergencia intracontinental entre la cordillera y la plataforma amazónica (Figura 1).

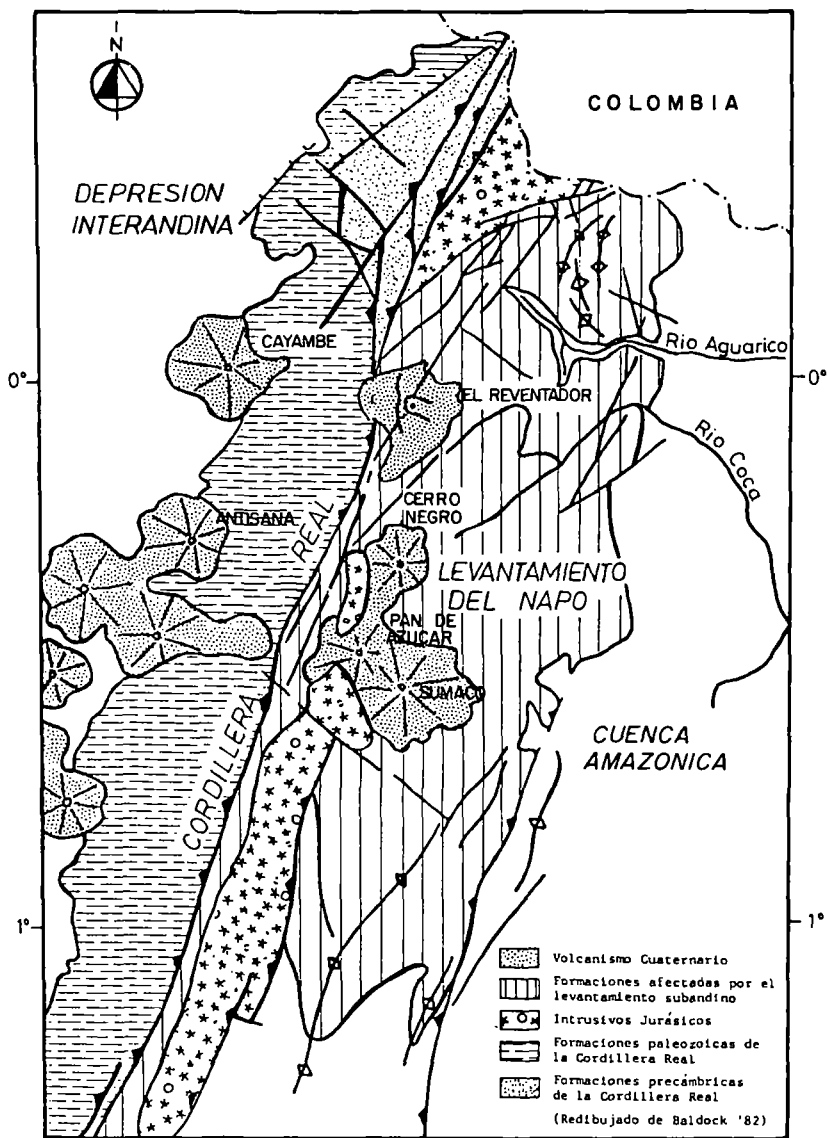


Figura 1.- Esquema Geológico del noreste de Ecuador

A continuación se describen las características de las unidades geológicas regionales presentes en el área de El Reventador, haciendo referencia al mapa y cortes geológicos adjuntos.

— Cordillera Real

Es la más oriental de las dos cadenas que conforman la "sierra" ecuatoriana. Se extiende a lo largo del territorio con una dirección N30°E presentando relieves que, comunmente, superan los 4.000 m.

Su prolongación hacia el norte, en territorio colombiano, adopta el nombre de Cordillera Central. Hacia el oeste se encuentra limitada por una serie de relieves volcánicos alineados a lo largo del margen de la Depresión Interandina.

En el sector septentrional, donde se halla el volcán El Reventador, la Cordillera Real está principalmente constituida, por dos grupos de rocas afectadas por diferente grado de metamorfismo.

El grupo Cofanes, que aflora en la parte más oriental de la cadena inmediatamente al norte de El Reventador, está constituido por migmatitas, ortogneiss y anfibolitas cuarzo-feldespáticas. Esta asociación de alto grado metamórfico indica la superposición de tres fases de deformación con metamorfismo retrógrado y representa, probablemente, el núcleo más antiguo de la Cordillera Real, de edad posiblemente pre-cámbrica. Según Baldock (1982), corresponde a las formaciones precámbricas de la Cordillera Real.

El grupo Ambuquí que aflora en el resto de la cadena, está constituido por rocas con un menor grado de metamorfismo, representadas por esquistos sericíticos ricos en grafito, micaesquistos y prasinitas, cuyas rocas originarias serían, presumiblemente, de edad paleozoica. Según Baldock (1982), corresponde a las formaciones paleozoicas de la Cordillera Real.

— Zona Subandina

Una franja de relieves que alcanzan hasta los 1.500 m de altura se encuentra separando las altas elevaciones de la Cordillera Real de la cuenca amazónica que se desarrolla hacia el este, sobre el escudo Guayanés. Esta franja, afectada por pliegues y fallas inversas, es más evidente en Colombia donde constituye un sistema orogénico autónomo denominado Cordillera Oriental. En el Ecuador se presenta en forma más discontinua y dividida en dos segmentos: el "levantamiento del Napo", al norte, y el "levantamiento de Cutucú", al sur.

En la provincia del Napo, la serie sedimentaria afectada por el levantamiento subandino, constituye el basamento de varios edificios volcánicos entre los cuales se encuentra El Reventador. En esta secuencia que se extiende a partir del Jurásico hasta el Mioceno medio, se han reconocido seis formaciones que se describen sumariamente a continuación:

- Formación Misahuallí (Jurásico medio-Cretácico inferior). Está constituida fundamentalmente por vulcanitas, basaltos, traquitas y tobas riolíticas, muy alteradas e interstratificadas con delgados horizontes sedimentarios de grano fino. La secuencia que alcanza un espesor de 2.000 m, se encuentra intensamente tectonizada y presenta, localmente, indicios de epimetamorfismo.
- Formación Hollín (Cretácico inferior: Aptiano-Albiano). Es una secuencia de poco espesor (de 100 a 240 m) constituida por areniscas cuarzosas con algunos horizontes arcillosos. Su contacto con la subyacente formación Misahuallí está marcado por una fuerte discordancia angular. La formación Hollín constituye la roca reservorio de los campos petroleros ubicados en el oriente ecuatoriano.
- Formación Napo (Cretácico: Albiano-Cenoniano). Las rocas de esta formación son las que afloran más extensamente en el área subandina. Se trata de argilitas, areniscas glauconíticas, calcáreas, calizas conchíferas, margas y lutitas silicificadas de espesor variable entre 300 y 700 m.
- Formación Tena (Cretácico superior-Paleoceno inferior?). Está constituida por una secuencia de algunos centenares de metros de arcillas con numerosas intercalaciones de areniscas y unos pocos conglomerados de origen continental. El contacto con la formación Napo, sub-

yacente, está marcado por un hiato o discordancia sedimentaria, acompañado localmente por un brusco cambio de facies.

Por encima de la formación Tena y separadas por otras tantas discordancias, se encuentran dos formaciones de origen continental. La formación Tiyuyacu está constituida por conglomerados, areniscas y argilitas, en tanto que en la suprayacente y, en parte, heterópica formación Chalcana predominan las argilitas con intercalaciones evaporíticas, estas unidades estratigráficas se encuentran ampliamente detalladas en el informe geológico del Proyecto Coca-Codo Sinclair, INECCEL 1983.

— Rocas Plutónicas

Algunos cuerpos intrusivos de gran tamaño, alargados en sentido NNE, ocupan parte de la zona subandina occidental a lo largo del contacto tectónico con la Cordillera Real (Figura 1).

El batolito de Abitagua se extiende por alrededor de 120 km desde Mera hasta el valle del río Quijos, estando cubierto a la altura del volcán Sumaco. Se trata de un cuerpo granítico-granodiorítico de edad, presumiblemente, jurásica que podría estar relacionado con las vulcanitas de la formación Misahuallí.

Al NNE de El Reventador, ya en territorio colombiano, se extiende el batolito de La Cuchilla que está compuesto, al menos en parte, por granito rosado. Su edad sería, presumiblemente, jurásica.

2.2 Tectónica

La tectónica de la Cordillera Real y de la Zona Subandina no ha sido, hasta ahora, estudiada en detalle. Se caracteriza por un complejo conjunto de lineamientos que han actuado en diversas fases tectónicas.

En la bibliografía no existen datos estructurales relativos a la parte septentrional de la Cordillera Real que, sin embargo, demuestra haber sido afectada por más de una fase de deformación y metamorfismo anteriores a la orogénesis andina.

El contacto entre la Cordillera Real y la Zona Subandina se resuelve mediante una serie de cabalgamientos de alto ángulo, inclinados hacia el WNW. Al sur de El Reventador estas estructuras se desarrollan a lo largo del valle del río Quijos con una dirección NNE; en cambio, en la región del volcán sufren una torsión hacia el N dispersándose en parte, para reaparecer más al norte con la orientación precedente N 30° E.

Algunos autores (Lonsdale y Klitgord, 1978; Pennington, 1981) sugieren que estos lineamientos presentan actualmente, una componente transcurrente dextral y, de esta forma, constituyen el límite oriental de una microplaca andina que se extendería en el Ecuador y Colombia entre la fosa oceánica y el continente sudamericano.

La Zona Subandina constituye una franja afectada por pliegues y sobrecomimientos de retroarco ("fold thrust belt") en la que, la serie de cobertura del escudo guayanés se ha desprendido formando escamas, hacia el este, por efectos del empuje andino.

Este modelo teórico encuentra su mejor ejemplificación en el Perú y, sobre todo, en Colombia, mientras que en el Ecuador la situación resulta bastante más compleja.

El "levantamiento del Napo" consiste principalmente en un gran anticlinorio de eje paralelo a la Cordillera Real, que se encuentra limitada, hacia el oeste, por los cabalgamientos andinos, mientras que por el este se enlaza con la cuenca amazónica mediante diversos tipos de estructuras: de sur a norte se observa primero un cabalgamiento, después una flexión y, finalmente, una serie de fallas inversas.

2.3 Reconstrucción paleogeográfica y geodinámica

Se conoce muy poco respecto a la paleogeografía pre-mesozoica del área estudiada, debido a que no existen afloramientos de rocas paleozoicas no metamorfizadas.

En el Paleozoico, esta región constituía el margen del cratón brasileño-guayanés que, hacia el oeste, dejaba espacio para una depresión en la que se depositaron los sedimentos de agua profunda que actualmente forman las rocas metamórficas de la Cordillera Real. La discordancia existente entre las formaciones paleozoicas no metamórficas que se observa al sur de la región del Cutucú, revela la existencia de fases tectónicas (hercínicas?) que estuvieron activas durante el Paleozoico superior (Faucher y Savoyat, 1973).

A partir de esta época, la Cordillera Real ha permanecido como un eje positivo que durante todo el Mesozoico, constituyó una dorsal sumergida que llegó a emerger apenas en el Maestrichtiano.

Mientras tanto, en la cuenca que se encontraba ubicada más al oriente, y durante el Jurásico, tenía lugar un importante episodio magmático que produjo las vulcanitas de la formación Misahuallí y los batolitos de Abitagua y La Cuchilla. La discordancia angular que existe entre las formaciones Misahuallí y Hollín, indica la presencia de una primera fase tectónica durante el Cretácico inferior. Se considera además, que la formación Hollín es el producto de una sedimentación terrígena proveniente del NE, o sea del escudo guayanés que en dicha época debía estar sujeto a erosión por encontrarse en una posición más elevada que la actual.

Posteriormente, la cuenca marginal oriental presentó una tendencia a profundizarse y a acentuar su grado de aislamiento tal como lo indican las facies claramente marinas y, a veces, euxínicas de la formación Napo. Hacia fines del Cretácico, el mar comenzó a retirarse, mientras que la sedimentación se tomó más terrígena como es evidenciado por las "capas rojas" de la formación Tena y de las formaciones posteriores.

Varias fases tectónicas se han sucedido durante el Pleógeno hasta producir el definitivo levantamiento de la Cordillera Real y el retiro del mar de la cuenca oriental que todavía permanecía como el escenario de una sedimentación de tipo continental (formaciones Tiyuyacu y Chalcana).

En el Mio-Plioceno se presentó una ulterior fase compresiva que originó el levantamiento de la zona subandina. Las series mesozoicas depositadas sobre el basamento cratónico guayanés se despegaron y plegaron, mientras el empuje hacia el este produjo el sobrecoimiento de la Cordillera Real sobre aquellas para formar los principales cabalgamientos andinos. La fuerte tectónica compresiva del Terciario inferior podría correlacionarse con el contemporáneo acrecimiento del arco insular Macuchi, a lo largo del margen Pacífico, que actualmente forma la cordillera occidental.

Recientes investigaciones paleo-magnéticas efectuadas sobre estos terrenos (Roperch et al, 1987) han confirmado la naturaleza alóctona de este microbloque crustal que se soldó al continente durante el Terciario, por efecto de la permanente subducción hacia el este de la placa de Nazca.

Los movimientos compresivos continuaron desarrollándose durante el Cuaternario, sobre todo dentro de la Zona Subandina, donde muchos lineamientos tectónicos frágiles pueden considerarse todavía activos.

Estos fenómenos estuvieron acompañados por el desarrollo de una amplia e intensa actividad volcánica que, durante el Terciario y el Cuaternario, originaron el arco magmático ecuatoriano (Barberi et al, 1987).

Importantes variaciones en las características de la litósfera oceánica subducida ejercitaron un fuerte control sobre el marco estructural de la placa sobrecoída y sobre la distribución espacio-temporal del volcanismo.

Las reconstrucciones cinemáticas de las placas en convergencia (Pilger, 1984) indican que hace 9 millones de años, se inició la subducción de la corteza oceánica generada en el centro de expansión Galápagos. La naturaleza de esta corteza, de espesores relativamente fuertes y de baja densidad, produjo importantes variaciones en el sistema convergente. Dichas variaciones se manifestaron con la migración, hacia el oriente, del frente volcánico activo.

En épocas más recientes probablemente en el Mioceno superior, penetró en la zona de subducción la Dorsal Carnegie que presenta una corteza oceánica todavía más potente y muy accidentada.

La deshidratación de este material, que ocurre en profundidad a lo largo de una franja relativamente extensa, provoca la ampliación en sentido transversal de la zona volcánica activa.

En el transcurso de esta fase, en la que continúa actuando un régimen compresivo, se verificaron algunos efectos distensivos locales sobre la Depresión Interandina y la Zona Subandina donde se observa el ascenso de magmas en posiciones muy internas coincidentes con las del edificio de El Reventador, del Cerro Negro, del Pan de Azúcar y del Sumaco.

3. ZONIFICACION ESTRUCTURAL DEL AREA ESTUDIADA

Dentro de la mayor parte de los sistemas de subducción cordillerana, es posible determinar una zona secundaria de compresión caracterizada por la presencia de pliegues y sobrecorrimientos ("back arc fold-thrust belt") que se inclinan hacia el continente (Dickinson, 1977). Esta zona se enlaza con el cratón continental ("back-arc basin") a través de una franja en la que predominan las deformaciones dúctiles y que presenta algunas fallas inversas y sobrecorrimientos.

Esta subdivisión ha sido aplicada, en el caso ecuatoriano, para la zona de transición entre la Cordillera Real y el Escudo Guayanés (Lonsdale, 1978; Suárez et al, 1983), a pesar de que, por lo menos en el área estudiada, se ha determinado una situación bastante más compleja.

El estudio fotogeológico de esta área ha sido realizado a través de la interpretación de las fotografías aéreas en escala 1:30.000 y 1:60.000, de imágenes radar a escala 1:90.000, y de imágenes Landsat MSS 1:1'000.000 en Banda 7. La mayor parte de los datos obtenidos fueron verificados mediante observaciones directas sobre el terreno (Figura 2 y Mapa Geológico).

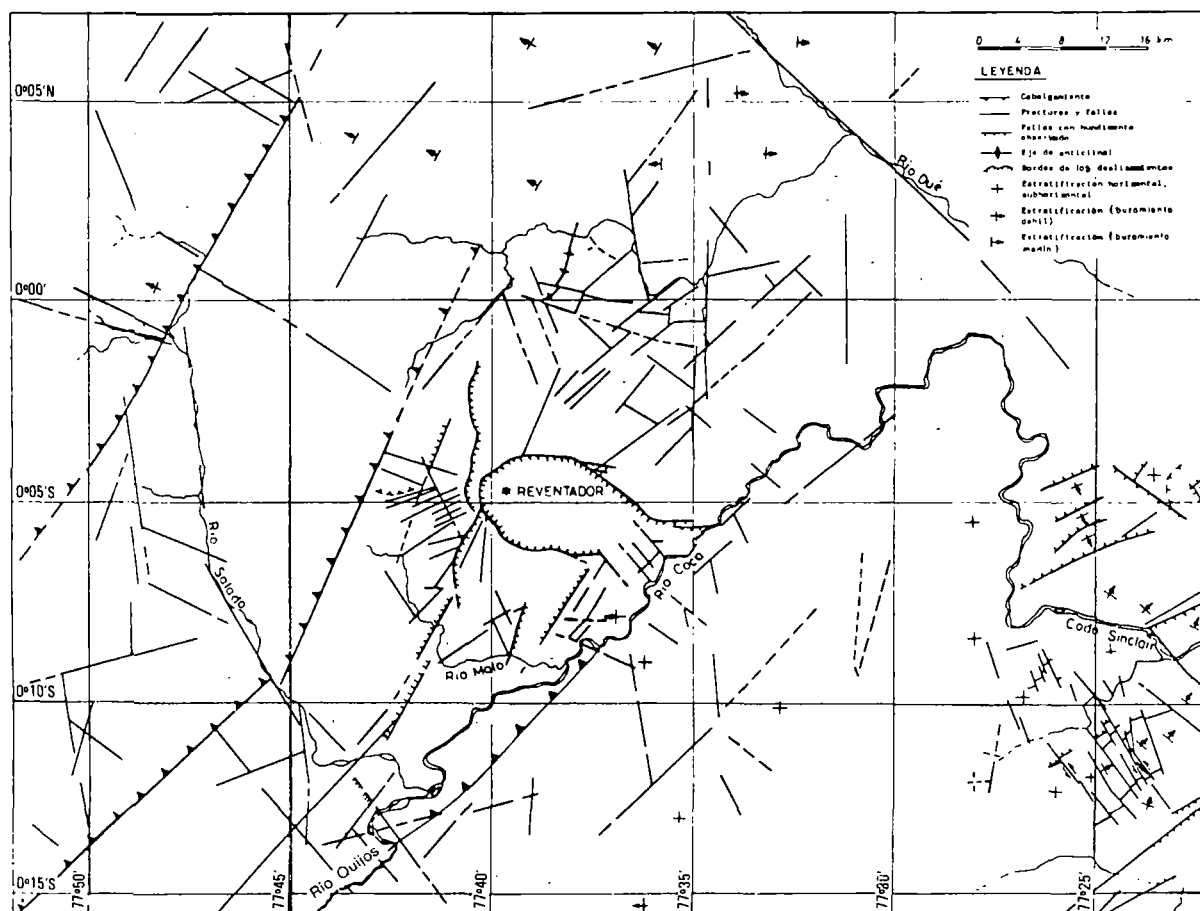


Figura 2.- Esquema estructural del área estudiada

En general, el área circundante al volcán, comprendida entre las latitudes $0^{\circ} 07'N$ - $0^{\circ} 15'S$ y las longitudes $77^{\circ} 52'W$ - $77^{\circ} 22' W$, presenta un predominio de las deformaciones de tipo frágil.

Los pliegues están limitados a las rocas mesozoicas, al NW del volcán y al NE del río Dué, sobre las cuales también se manifiestan densos sistemas de fallas y fracturas que se incrementan en el área de El Reventador. Al SE del mismo existe otra área que permanece tectónicamente poco disturbada.

A la altura del sector Codo Sinclair, se observan algunas evidencias de estructuras distensivas locales que han creado un mosaico de bloques fallados. La multiplicidad y complejidad de las deformaciones presentes conduce, entonces, a subdividir el área investigada en una serie de zonas estructurales que se describen a continuación (Figura 3).

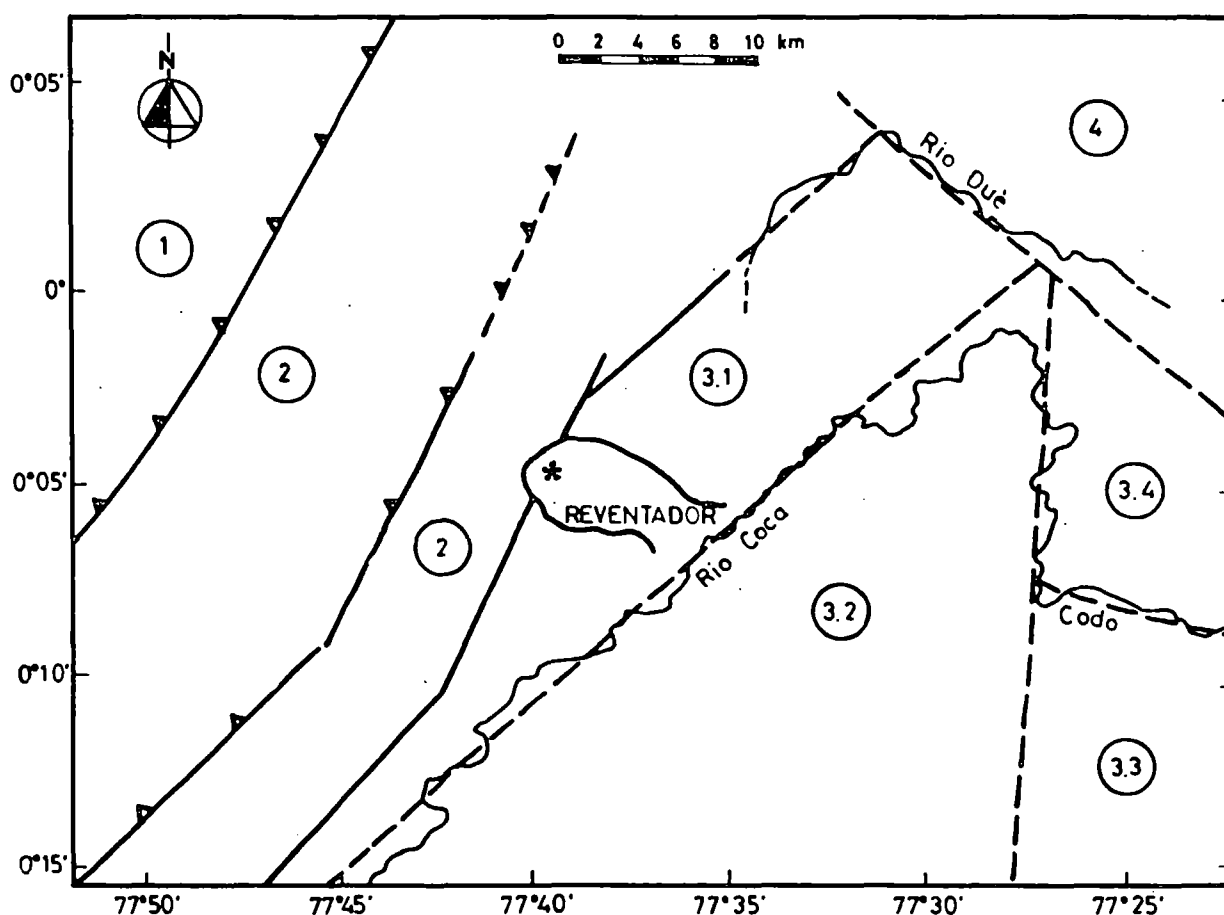


Figura 3.- Zonificación estructural del área estudiada

1.- Zona de los cabalgamientos; 2.- Zona de escamas; 3.- Zona con deformaciones frágiles; 3.1.- Subzona El Reventador; 3.2.- Subzona río Coca; 3.3.- Subzona Codo Sinclair S.E.; 3.4.- Subzona Codo Sinclair N.E.; 4.- Zona de pliegues.

— Zona de los cabalgamientos

Esta zona se presenta alargada en sentido NNE-SSW y se encuentra limitada, al oriente, por el frente de los cabalgamientos principales de la Cordillera Real. La foliación y esquistosidad de las rocas metamórficas paleozoicas que afloran en esta zona, están inclinadas esencialmente hacia el NW y, en menor escala, hacia el SE. También están presentes sistemas de pliegues decimétricos a decamétricos, de eje paralelo y subparalelo a los frentes de sobrecorrimento.

Se han reconocido cuatro familias principales de fallas, de las cuales la más desarrollada tiene una dirección NNE-SSW que es coincidente con los planos de sobrecorrimento y las correspondientes estructuras secundarias. Se encuentran también presentes fallas NW-SE, perpendiculares a los frentes de sobrecorrimento y fallas NNW-SSE y WSW-ENE (Figura 2).

— Zona de escamas

Esta zona, alargada en dirección NNE-SSW, se encuentra limitada al occidente por el frente de cabalgamiento externo de la Cordillera Real y, al oriente, por un marcado alineamiento de fallas predominantemente compresivas paralelas a dicho frente.

El centro eruptivo de El Reventador se encuentra ubicado exactamente sobre el límite oriental de esta zona y cortado por el antes mencionado alineamiento de fallas (Figura 3).

Las rocas de esta zona están representadas por sedimentos mesozoicos dinamometamorfizados que forman un haz de pliegues y escamas de dirección paralela a la del frente de la zona de los cabalgamientos.

Los pliegues varían en tamaño desde decimétricos hasta métricos y presentan una marcada inclinación hacia el ESE pasando de tumbados a volcados.

Están presentes tres familias principales de fallas: NNE-SSW, NNW-SSE y WSW-ENE. En el ámbito del volcán El Reventador se pueden notar rasgos de movimientos distensivos a lo largo de las fallas NNE-SSW, algunos de los cuales evidencian la zona de desprendimiento del primer derrumbe que afectó el más antiguo y complejo edificio volcánico (Figura 2).

— Zona con deformaciones frágiles

- **Subzona El Reventador.** Se presenta en forma de una cuña con su vértice orientado hacia el SW y está limitada, al occidente, por el alineamiento de fallas NNE-SSW, al oriente, por el río Quijos-Coca y, al norte, por el río Dué (Figura 3).

La deformación predominante es del tipo frágil caracterizada por la primacía de un sistema conjugado de fallas NE-SW y NW-SE, que propablemente tiene un carácter transcurrente. Se reconoce también una serie de fallas compresivas NNE-SSW, subparalelas al frente de la zona de escamas, y algunas fallas de dirección N-S que constituirían el lineamiento frágil más reciente.

En esta subzona se ubica el anfiteatro originado por el segundo derrumbe que afectó el edificio del Volcán Paleoreventador, el mismo que se encuentra principalmente interesado por lineamientos de fracturas NW-SE y NNE-SSW. Algunas fallas pertenecientes a esta última familia presentan evidencias de movimientos distensivos que, en conjunto, han determinado una estructura de "horst" y "graben" en el flanco suroccidental del volcán (Figura 2).

- **Subzona río Coca.** Se encuentra limitada, al occidente, por una gran falla de dirección SW-NE que sigue el curso del río Quijos-Coca y, al oriente, por el tramo N-S del mismo río que se ubica al norte del sector Codo Sinclair (Figura 3).

El buzamiento de los estratos sedimentarios mesozoicos es horizontal a subhorizontal observándose, como característica principal, la ausencia de vistosos fenómenos deformativos. Solamente se nota un pequeño número de lineamientos frágiles con una dirección preferencial N-S y NE-SW (Figura 2).

- **Subzona Codo Sinclair SE.** El sistema de fallas orientadas NW-SE está particularmente difundido al SE del sector Codo Sinclair, donde posee un marcado carácter transcurrente sinistral y parece dislocar a la familia de fallas NE-SW. El buzamiento general de la estratificación varía de horizontal a subhorizontal con una ligera inclinación hacia el NE (Figura 2).

- **Subzona Codo Sinclair NE.** En esta subzona comprendida entre el sector Codo Sinclair y el río Dué, la cobertura sedimentaria mesozoica se encuentra fallada según un sistema de bloques basculados que localmente llegan a evidenciar dos ejes de rotación perpendiculares entre sí. Los planos de estratificación buzcan hacia el NE o hacia el SE; mientras que las dos principales familias de fallas presentes son todavía la NE-SW y la NW-SE (Figura 2).

— Zona de pliegues

En el sector al NE del río Dué, a pesar de que permanecen todavía relevantes los fenómenos de fracturación, la deformación plástica se convierte en el estilo estructural dominante dentro de la serie sedimentaria mesozoica. Los pliegues presentan dimensiones notables, decamétricas a kilométricas, y resultan muy evidentes alineándose hacia el NE hasta la zona de Bermejo.

El sistema general, caracterizado por compartimientos de diferente fisonomía estructural, se encuentra dominado por fallas compresivas y transcurrentes las cuales indican que esta zona se enmarca dentro del cuadro más amplio de convergencia intracontinental para cuya comprensión resultaría necesario un estudio estructural de mucho mayor alcance.

4. GEOLOGIA DEL COMPLEJO VOLCANICO EL REVENTADOR

La serie del complejo volcánico El Reventador que recubre a las formaciones mesozoicas de la región del Napo, está constituida por una secuencia de productos efusivos y explosivos que alcanzan espesores de alrededor de 1.000 m.

Dentro de ella se ha podido distinguir tres grandes unidades correspondientes a otros tantos edificios volcánicos que representan las principales etapas de evolución del complejo volcánico El Reventador (Figura 4 y Mapa Geológico):

- El Complejo Volcánico Basal (CVB)
- El Volcán Paleoreventador (VPR)
- El Volcán El Reventador (VER), o cono actual

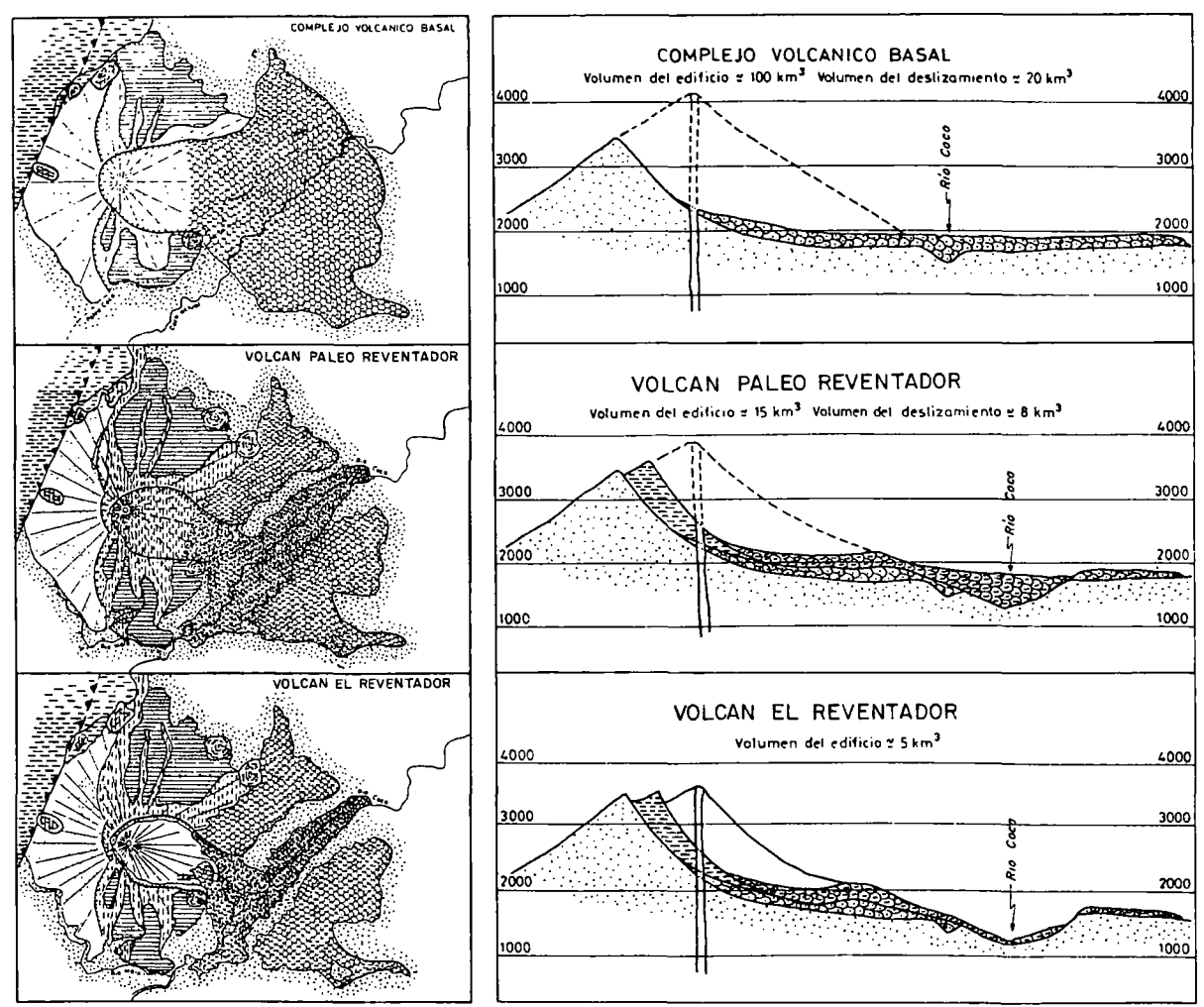
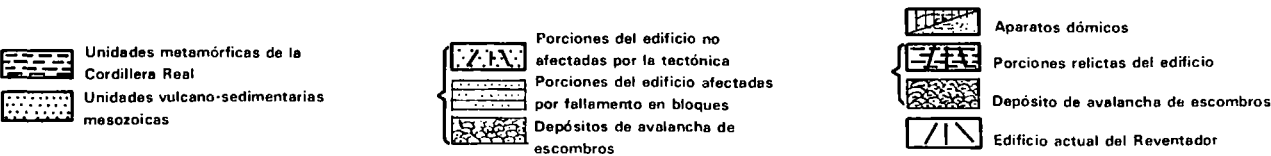


Figura 4.- Esquema de las principales etapas de evolución del complejo volcánico El Reventador.
Planos de los contactos tectónicos y perfiles evolutivos.



4.1 Los edificios volcánicos

— Complejo Volcánico Basal (CVB)

Aflora esencialmente en la parte occidental y septentrional del actual sistema eruptivo y está limitado, al este, por un gran lineamiento tectónico constituido por tres fallas arqueadas alineadas en dirección N-S.

Sus productos están constituidos por ignimbritas, lavas e intercalaciones de brechas volcánicas primarias y retrabajadas. Las ignimbritas se encuentran presentes sobre todo en la parte basal de la secuencia donde se han reconocido cuatro unidades de flujo con intercalaciones menores de "surge" y piroclásticos de caída.

El buzamiento general que presentan los productos del CVB sugiere que estos fueron emitidos por un centro eruptivo ubicado cerca del actual conducto del volcán. En su parte centro-meridional y oriental, el CVB se encuentra constituido por porciones aisladas que presentan importantes dislocaciones tectónicas.

En conjunto, la disposición general del CVB sugiere que lo que actualmente se observa son las porciones relictos de un gran estrato-volcán cuyo volumen se estima en alrededor de 100 km³.

A este también se agregan varios centros dómicos algunos de los cuales todavía presentan bien conservada su típica morfología, sobre todo en el sector de la ladera septentrional del volcán donde los productos lávicos evidencian una composición predominantemente dacítica (Figura 5).

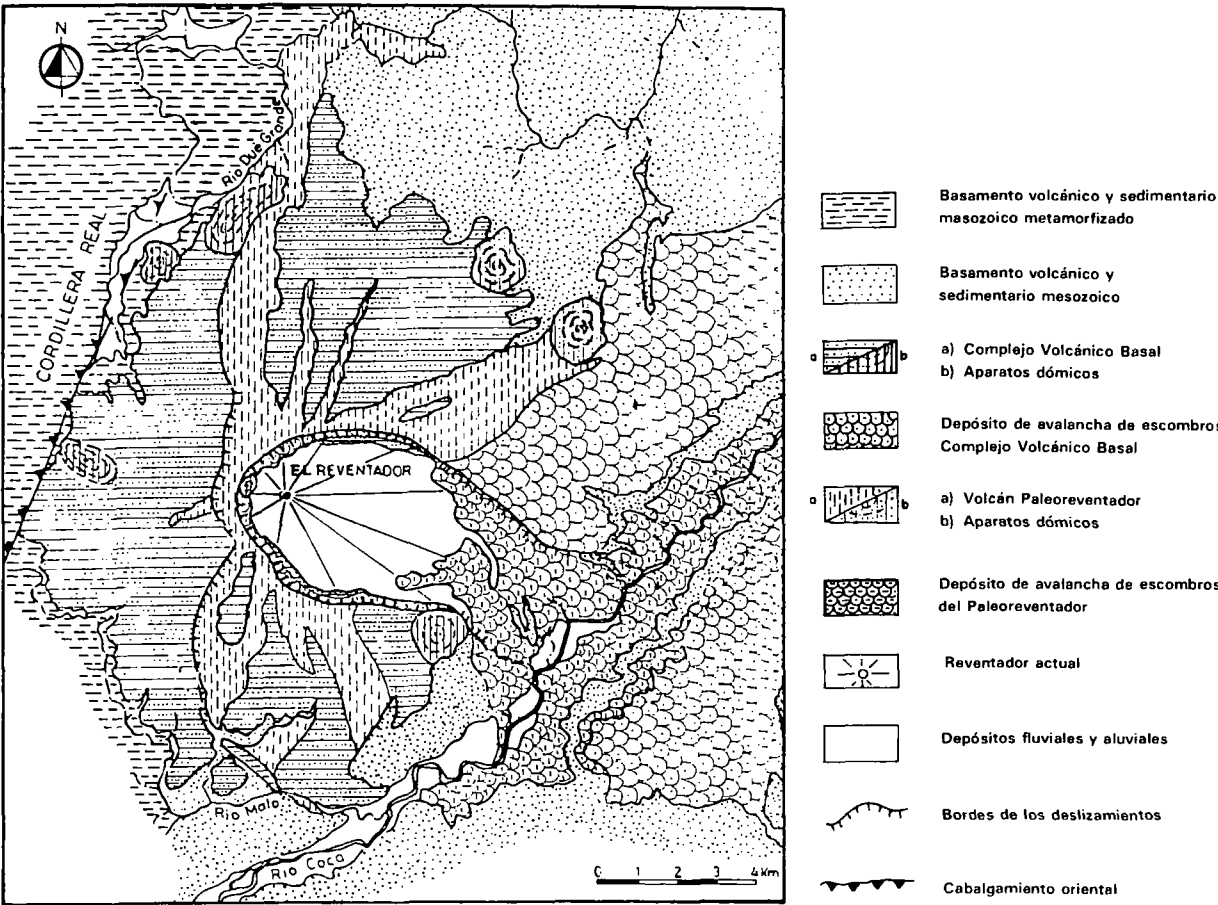


Figura 5.- Esquema geológico del área del Complejo Volcánico El Reventador

Si se considera que, también en la ladera meridional, se encuentran este tipo de lavas, se podría concluir que los magmas diferenciados estuvieron bastante difundidos durante la actividad inicial del CVB, aunque sus centros de emisión no resulten siempre reconocibles en la actualidad.

Al SE del cono actual se encuentra el cerro Copete que se presenta como una masa lávica compacta, de apariencia cómica, pero con una composición menos evolucionada respecto a la de los centros previamente mencionados. En tal virtud, éste probablemente representa el estancamiento de una masa magmática de composición andesítica en la porción cortical del CVB que ha sido descubierta por efecto de la erosión.

En la ladera septentrional, los aparatos cómicos de los cerros Líder y Mirador, por su morfología mejor conservada, parecen atribuibles a una fase magmática tardía del CVB.

Una importante porción del edificio volcánico del CVB se presenta actualmente como un gigantesco depósito de avalancha de escombros consecuente al colapso que afectó a los sectores oriental y central del antiguo volcán (Figura 4).

El volumen de los materiales derrumbados puede estimarse en alrededor de 20 km³, considerando la parte que se encuentra todavía en el sitio y lo que habría sido arrastrada por la erosión del río Coca (Figura 5). Es todavía reconocible el contacto inferior de la avalancha que forma una paleosuperficie ubicada aproximadamente en la cota 1.600 m, sobre los sedimentos cretácicos, la misma que, al momento del colapso, tenía una elevación muy próxima a la del paleocauce del río Coca. La distancia máxima recorrida por este enorme deslizamiento a partir del cráter del CVB, puede estimarse en unos 19 km.

Los depósitos de esta avalancha de escombros están constituidos por un agregado heterogéneo de bloques con un tamaño variable, de centimétrico a métrico, y con un buen grado de redondeamiento y esfericidad. La composición de los bloques refleja el promedio de los productos del CVB. La matriz se presenta bastante litificada y con granulometría variable entre limo y arena.

— Volcán Paleoreventador (VPR)

Los productos del Complejo Volcánico Basal, fuertemente desmembrados y erosionados, están cubiertos por una secuencia mixta de productos explosivos y efusivos cuya zona de emisión estuvo ubicada más o menos coincidentemente con el cono actual del volcán.

La distribución areal de los productos de este centro, denominado Volcán Paleoreventador (VPR), está fuertemente condicionada por la morfología anómala del substrato que fue modelada por la tectónica precedente. Esto ha determinado la construcción de un estrato-volcán fuertemente asimétrico y alargado en dirección N-S y NE-SW, según las directrices tectónicas predominantes (Figura 4).

La actividad del VPR está caracterizada por una compleja alternancia de productos lávicos y piroclásticos, estos últimos a menudo re TRABAJADOS.

A partir de las secciones estudiadas en el borde del anfiteatro, ha sido factible definir esquemáticamente una subdivisión aproximada de la serie del VPR.

En la parte más antigua del cono, que aflora en la base de la pared norte del anfiteatro, se han reconocido productos lávicos de composición básica, principalmente basaltos y andesitas basálticas.

Ascendiendo hacia las partes más altas del anfiteatro, afloran productos lávicos con un quimismo andesítico y una oscilación composicional variable entre andesitas basálticas y andesitas. Intercalados con las lavas andesíticas se encuentran niveles piroclásticos, principalmente de caída, y, en menor proporción, de flujo.

La más importante secuencia de productos explosivos aflora en la sección más occidental del anfiteatro y en ella pueden reconocerse dos fases de actividad separadas por un paleosuelo. La primera fase se encuentra constituida principalmente por productos de caída con pequeños fragmentos de pómez y lapilli de color claro. La segunda fase se caracteriza por un depósito localmente muy potente, hasta 20 m, formado por niveles de pómez de caída del tipo pli-

niano, que posteriormente pasan a flujos piroclásticos. Ambos depósitos se encuentran dispersos hasta una distancia de alrededor de 20 km desde el cráter actual, hacia el este, sureste y suroeste.

La aparente inexistencia de estos productos en los sectores septentrionales del volcán podría relacionarse con una distribución original en forma no radial; o, más bien, con la erosión y/o con la dificultad de acumulación sobre las fuertes pendientes del edificio.

Una erupción de este tipo implicaría la existencia de una cámara magmática de tamaño relativamente grande cuyo volumen estaría comprendido entre 1 y 4 km³.

Fuera del anfiteatro afloran las lavas con las que, presumiblemente, concluyó la actividad del VPR. Estas presentan una composición basáltica que corresponde a la menos evolucionada del volcán; afloran directamente por debajo de los depósitos de la avalancha de escombros, o bien en el sector meridional del volcán donde han confluído las coladas más recientes.

Entre los productos del VPR aparece una masa lávica, en forma de domo, el domo Cuchilla, con una composición andesítica alta en sílice, que aflora en el borde occidental del anfiteatro dentro de la secuencia de los productos más superficiales del volcán.

El edificio del VPR fue destruido por fenómenos de colapso y deslizamiento en masa. La forma lobulada de la depresión actualmente visible indica que el edificio fue afectado por:

- a. Un colapso debido, probablemente, al vaciado de la cámara magmática como resultado de la violenta erupción piroclástica evidenciada por los depósitos pumíticos antes descritos.
- b. Un gigantesco deslizamiento que afectó a la vertiente oriental del cono colapsante.

Sin embargo, la principal causa de inestabilidad habría sido representada por la acelerada erosión del río Coca que actuaba en la base del edificio.

El frente de la avalancha rebasó el cauce del río y ascendió por la ladera opuesta hasta recubrir, en parte, al depósito de avalancha de escombros del CVB.

En los depósitos de la avalancha de escombros del VPR se reconocen diversas facies:

- En la parte basal se encuentran elementos lávicos muy deformados y fracturados según una dirección que se orienta a lo largo del plano del movimiento.
- En la parte media y superior se encuentran bloques decamétricos muy fracturados y englobados en una matriz limo-arcillosa.

Existen también, zonas en las cuales los bloques se vuelven más escasos presentándose redondeados o subredondeados. Además, en algunas zonas, la avalancha parece haber incorporado grandes bloques pertenecientes al depósito de la avalancha precedente.

La parte terminal del anfiteatro se caracteriza por la presencia de una contrapendiente morfológica, formada por los depósitos de avalancha que han obstruido, en parte, a la depresión en la cual se ha levantado el cono actual de El Reventador. Posteriormente esta depresión ha sido abierta por efecto de la acción erosiva de los ríos Reventador, Engaño y Marker.

— Volcán El Reventador, cono actual (VER)

Está constituido por un cono regular con una altura máxima de 3.562 m y un volumen total estimado en unos 5 km³ (Figura 4).

El volcán ha generado numerosas coladas de lava, principalmente en bloques, que se han acumulado dentro de la depresión originada por la antigua avalancha. Consecuentemente, la morfología general del edificio resulta asimétrica, pues el lado oriental es el más desarrollado.

En la cima se encuentran dos cráteres de los cuales permanece activo el más oriental. Dentro del mismo cráter oriental se observan evidencias de una ulterior migración hacia el este. El diámetro del cráter activo mide cerca de 100 m y su fondo, situado a una profundidad de 40 m del borde, presenta varios cráteres de explosión freática.

El cono actual del VER se ha formado por una actividad moderadamente explosiva, clasificada como estromboliana en base a las observaciones de su última erupción ocurrida entre abril y mayo de 1976 (Hall, 1977).

Entre los productos emitidos predominan las coladas de andesitas basálticas con algunas brechas y depósitos laháríticos. Todos estos productos permanecen dentro del anfiteatro y, por lo tanto, nunca han alcanzado el cauce del río Coca.

En cambio, los productos piroclásticos se han distribuido sobre una extensa área ubicada principalmente al oeste del cono, según la dirección con la que soplan los vientos alisios dominantes. La mitad superior del cono se encontraba, hasta antes del sismo del 5 de marzo de 1987, completamente cubierta por productos piroclásticos.

Al contrario, las coladas lávicas se extienden hacia el este en la parte plana del anfiteatro donde tienden a confluir y acumularse formando campos de lava.

4.2 Las avalanchas de escombros

Como se ha mencionado, durante la historia evolutiva del complejo volcánico El Reventador ocurrieron dos enormes avalanchas que provocaron la destrucción de los respectivos edificios volcánicos.

El volumen total del material derrumbado ha sido estimado en 28 km³, aproximadamente.

Los dos eventos en mención estuvieron separados por un importante lapso cronológico que se caracterizó por el desarrollo de una fase tectónica compresiva y por grandes variaciones estructurales, morfológicas y topográficas. Es importante señalar que entre las dos avalanchas existen notables diferencias en cuanto a su volumen, composición y, desde luego, a su mecanismo desencadenante.

En forma esquemática, las principales diferencias reconocidas entre las dos avalanchas son las siguientes:

- El volumen de la avalancha del Complejo Volcánico Basal, denominada A-1, es de unos 20 km³, mientras el de la avalancha del Volcán Paleoreventador, denominada A-2, es de 8 km³, aproximadamente.
- La avalancha A-1 ocurrió cuando el cauce del río Coca se encontraba en una fase de madurez formando meandros poco profundos alrededor de la cota 1.600 m. Dicho cauce se encontraba, además, ubicado 2 km más cerca del volcán respecto a su posición actual.
- La avalancha A-2 se produjo después de que el cauce del río Coca se había profundizado en unos 500 m desarrollando varios meandros encajonados que, posteriormente, fueron rectificados por una sucesiva fase de rejuvenecimiento del sistema erosivo.
- La avalancha A-1 ocurrió durante la fase tectónica compresiva antes mencionada, mientras que la A-2 se produjo al final de la misma.
- La avalancha A-1 se caracteriza por presentar una textura caótica, pero con una variación relativamente baja en cuanto al tamaño de los bloques y por una distribución homogénea de los mismos en la matriz areno-limosa.
- Por el contrario, la avalancha A-2 presenta bloques de dimensiones muy variables incluidos en una matriz muy heterogénea. Esta incluye también megabloques en algunos de los cuales se observan, relativamente bien conservadas, las estructuras primarias. La estructura basal de la avalancha A-2 presenta intensas iso-orientaciones en flamas de los bloques microfracturados, frecuentemente fumarolizados.
- La avalancha A-1 no parece estar relacionada con cambios notables en la actividad volcánica del CVB, en tanto que la avalancha A-2 estuvo seguramente acompañada por importantes episodios explosivos que originaron productos de caída y de flujo piroclástico y, probablemente, un colapso caldérico que se evidencia en la zona circular ubicada al extremo occidental del anfiteatro.

- Las observaciones expuestas inducen a expresar la hipótesis que las dos avalanchas ocurrieron dentro de un marco distinto; la A-1 parece ser una avalancha fría, de origen sismo-tectónico, mientras que la A-2 se caracteriza por la importante contribución de una actividad volcánica explosiva al momento de iniciarse el fenómeno.

Cabe observar también que la avalancha A-1 se produjo en presencia de las condiciones típicas que caracterizan a las avalanchas causadas por terremotos (Keefer, 1984); es decir:

- Laderas con un ángulo de inclinación superior a 25° y un desnivel mayor que 150 m.
- Erosión fluvial al pie de las laderas volcánicas.
- Presencia de rocas heterogéneas e intensamente fracturadas.

Para la avalancha A-2, además de estar presentes las mismas condiciones de inestabilidad geológica que caracterizan a la A-1, se han reconocido evidencias, al inicio del fenómeno, de una importante fase volcánica explosiva que, muy probablemente, estuvo acompañada por un colapso tectónico y una crisis sísmica.

En fin, es importante señalar que toda la actividad del complejo volcánico El Reventador, incluyendo las dos avalanchas, estuvo controlada por la presencia de la falla de El Reventador, con rumbo NNE-SSW, que separa las escamas de las rocas mesozoicas metamorizadas, al oeste, de los pliegues que afectan a las rocas mesozoicas no metamorizadas, al este (Figura 2).

4.3 Dataciones absolutas

Para adquirir datos cuantitativos sobre los principales períodos de actividad del complejo volcánico El Reventador, se seleccionaron algunas muestras de roca para efectuar dataciones radiométricas K/Ar.

Fueron también analizadas, a través del método ^{14}C , algunos restos vegetales encontrados en los horizontes sedimentarios intercalados a los depósitos piroclásticos y en los sedimentos del lago que se formó después de la avalancha del Volcán Paleoreventador.

— Determinaciones radiométricas K/Ar

Estas determinaciones K/Ar se efectuaron sobre tres muestras de andesita y andesita basáltica del Complejo Volcánico Basal y sobre una muestra de basalto del Volcán Paleoreventador.

La selección de las muestras se efectuó en base de su posición estratigráfica asignando una particular atención a las muestras representativas de los niveles más bajos de la serie para las cuales se consideraba más probable obtener resultados confiables. En efecto, la edad relativamente joven del complejo volcánico de El Reventador hacía presumir, desde el inicio de los estudios, que habrían dificultades respecto a las determinaciones de la edad absoluta, como comunmente ocurre en el caso de muestras de vulcanitas recientes.

Las dataciones sobre plagioclasas se efectuaron en el Laboratorio de Geocronología de la Universidad de Berna, Suiza. La determinación del Ar sobre muestras jóvenes se realizan, normalmente, después de un ataque con HF para eliminar, lo más posible, el Ar atmosférico absorbido en la parte externa de la fase a analizarse. Las muestras han sido ensayadas siempre por duplicado para poder realizar determinaciones también sobre las muestras no atacadas con HF.

Los resultados de las dataciones radiométricas K/Ar que se presentan en el Cuadro 4/1, indican lo siguiente:

- Los bajos tenores de Ar radiogénico producen errores analíticos muy altos.
- Existe una general incongruencia entre las determinaciones efectuadas sobre muestras tratadas y no tratadas. Sólo en el caso de una muestra de andesita del CVB se observa una buena concordancia entre las dos determinaciones (319.000 y 378.000 años).

- Los datos aparecen, en su conjunto, geológicamente incongruentes y permiten deducir la presencia de Ar atmosférico en exceso, lo que constituye un fenómeno frecuente en las lavas jóvenes.

Con el propósito de verificar esta última condición se han efectuado dos determinaciones sobre las plagioclasas de una muestra de basalto del VPR, utilizando características granulométricas distintas: 100-160 mesh y 160-300 mesh, respectivamente.

Los resultados aparecen totalmente contradictorios; en efecto, la edad aparente varía entre 10.7 y 0.7 millones de años. También dentro de cada fracción individual se presentan fuertes diferencias en la edad aparente. Esta prueba indica, con seguridad, que la muestra ha estado afectada por un exceso de Ar radiogénico que ha penetrado al interior de la fase analizada.

Las determinaciones radiométricas sobre distintas granulometrías corresponden, de hecho, a relaciones fuertemente variables entre mineral contaminado por exceso de Ar y mineral no contaminado, que reflejan los diferentes valores de edad aparente encontrados.

En conclusión, podría afirmarse que las determinaciones efectuadas indican la presencia de Ar radiogénico en exceso que hace inutilizables a los resultados obtenidos. Además, debe mencionarse que únicamente una muestra de andesita del CVB, indica dos valores de edad aparente concordantes dentro de los límites del error analítico. Esto hace que se le considere aceptable a dicha determinación y, por lo tanto, utilizable para interpretar la evolución geológica del volcán.

La edad de esta roca (alrededor de 350.000 años) que corresponde a los niveles más antiguos del CVB, próximos al basamento mesozoico, aflorantes en el valle del río Dué Grande, parece ser coherente con las observaciones geológicas de campo llevadas a cabo en el mismo sector.

— Determinaciones radiométricas 14C

Con el objeto de datar con este método las principales etapas evolutivas de las unidades que constituyen el complejo volcánico El Reventador, se recolectaron también varias muestras de madera y paleosuelos incluidas en diferentes niveles estratigráficos.

De ellas se analizaron 8 muestras consideradas las más representativas y adecuadas para este tipo de determinación, en el Laboratorio de Química Isotópica de la Universidad de París, Francia.

La ubicación, la posición estratigráfica y los resultados relativos a cada una de las muestras estudiadas, se presentan en el Cuadro 4/2.

La muestra 14C-1 es un trozo de madera encontrado en los depósitos de la avalancha de escombros del VPR. Su edad es congruente con la de 20.000 años determinada en el curso de los estudios anteriores de factibilidad del Aprovechamiento Salado (1978).

La muestra 14C-2 es un trozo de madera que estuvo incluido en la avalancha de escombros del VPR. Su edad (600 años) es inconsistente con su posición estratigráfica. Esta inconsistencia se debe, probablemente, al hecho que la muestra se tomó en una porción recién derumbada de la avalancha y, por lo tanto, pudo haberse mezclado con material orgánico más reciente.

La muestra 14C-6 es un trozo de madera carbonizada cuya posición estratigráfica es dudosa, pues no ha podido determinarse si es anterior o posterior a la avalancha del VPR. La edad relativamente reciente (8.500 años) haría disminuir la segunda posibilidad.

Las muestras 14C-17 y 18 son trozos de madera encontrados en los limos areno-arcillosos depositados en el lago formado por la avalancha de escombros del VPR. Las edades respectivas (500 y 4.000 años) son inconsistentes debido a probables contaminaciones.

La muestra 14C-19 es un trozo de madera encontrada en los depósitos piroclásticos del VPR. Su edad (19.500 años) es congruente con la edad relativa a la actividad del VPR y a su colapso.

Las muestras 14C-20 y 21 son trozos de madera que fueron encontrados en los lahares y en los depósitos de la avalancha de escombros del CVB. Las edades respectivas (mayores de 30,000 años) que resultan ser las más antiguas determinadas en el curso de los estudios, pueden ser consideradas congruentes para la definición de la historia evolutiva de los edificios que constituyen el complejo volcánico El Reventador.

Se debe mencionar que todas las muestras datadas estuvieron incluidas en depósitos muy permeables y, por lo tanto, expuestas a la acción persistente del agua meteórica. Por estas razones los datos obtenidos deben ser tomados con ciertas cautelas.

CUADRO 4/1

RESULTADOS DE LAS DETERMINACIONES RADIOMETRICAS K/Ar

| Tipo de roca | Unidad vulcanológica | K (%) | 40 Ar rad ccm/g STP 10 ⁻⁶ | 40 Ar rad (%) | Edad (Ma) |
|---|----------------------|-------|--------------------------------------|---------------|------------------|
| Andesita (A) | CVB | 0,34 | -0,0045 | -2,75 | -0,340796 ± 0,29 |
| Andesita (B) | CVB | 0,34 | 0,00011 | 0,04 | 0,867850 ± 0,26 |
| Andesita (A) | CVB | 0,33 | 0,0041 | 2,31 | 0,318686 ± 0,25 |
| Andesita (B) | CVB | 0,33 | 0,0049 | 3,18 | 0,378356 ± 0,65 |
| Andesita basáltica (A) | CVB | 0,14 | 0,0029 | 0,58 | 0,531842 ± 0,77 |
| Andesita basáltica (B) | CVB | 0,14 | -0,00068 | -0,13 | -0,125401 ± 0,95 |
| Basalto (A) (100-160 mesh) | VPR | 0,16 | 0,012 | 4,39 | 1,89837 ± 0,82 |
| Basalto (B) (100-160 mesh) | VPR | 0,16 | 0,0046 | 0,86 | 0,736691 ± 0,62 |
| Basalto (A) (160-300 mesh) | VPR | 0,22 | 0,069 | 23,53 | 8,10315 ± 0,56 |
| Basalto (B) (160-300 mesh) | VPR | 0,22 | 0,092 | 14,57 | 10,7126 ± 0,51 |
| (A) = muestra original (B) = muestra atacada con HF Ma = millones de años | | | | | |

CUADRO 4/2

RESULTADOS DE LAS DETERMINACIONES RADIOMETRICAS 14C

| Muestra N° | Tipo de muestra | Ubicación | Posición estratigráfica | Actividad 14C (%) | Edad BP (años) |
|------------|-----------------|--|--|-------------------|----------------|
| C14-1 | Madera | Sector Manuel Galindo, margen izquierda del río Coca | Avalancha de escombros A-2 | 9,7 ± 0,6 | 18.875 ± 460 |
| C14-2 | Madera | Cascada S. Rafael, margen derecha | Avalancha de escombros A-2 | 92,8 ± 0,6 | 600 ± 60 |
| C14-6 | Carbón | Cerro Copete | Parte superior del VPR o actividad posterior a la avalancha de escombros A-2 | 34,7 ± 0,4 | 8.500 ± 90 |
| C14-17 | Madera | Sector Manuel Galindo, margen izquierda del río Coca | Limo del lago formado por la avalancha de escombros A-2 | 93,9 ± 2,1 | 500 ± 180 |
| C14-18 | Madera | Sitio Salado, margen izquierda | Limos fluvio-lacustres | 60,8 ± 1,0 | 4.000 ± 140 |
| C14-19 | Madera | Ladera septentrional, río Dantas | Depósitos piroclásticos del VPR | 8,8 ± 0,3 | 19.500 ± 240 |
| C14-20 | Madera | Ladera occidental, cabecera del río Malo | Lahares del CVB | - | 30.000 |
| C14-21 | Madera | Río Dué, zona del cerro Líder | Avalancha de escombros A-1 | - | 30.000 |

BP: Antes del presente

5. TECTONICA LOCAL

El complejo volcánico El Reventador, en su conjunto, está caracterizado por una intensa fracturación que refleja una notable y persistente actividad tectónica.

En base a la geometría y a la distribución de las fallas y fracturas en las tres unidades vulcanológicas, se presenta a continuación una reconstrucción de los principales eventos tectónicos, (ver Mapa Geológico).

— Complejo Volcánico Basal (CVB)

El Complejo Volcánico Basal está interceptado por varios sistemas de deformación frágil debidos a la superposición de varios eventos tectónicos (Figuras 2 y 4). El sector nororiental del CVB se encuentra afectado por un enjambre de fallas NE-SW paralelas al valle del río Coca, que, en los alrededores del cerro Mirador, aparecen cortando a lavas y, en la zona del río Azuela, a los depósitos de avalancha de escombros. En esta zona la familia de fallas de rumbo NE-SW se cruza con otra de rumbo N-S.

El sector noroccidental del CVB está afectado por una muy densa red de fallas de rumbo NNE-SSW, WSW-ENE, N-S y NW-SE, en orden de desarrollo lineal. Además, en este sector, el CVB está atravesado, en sentido N-S, por un alineamiento de fallas listricas cóncavas hacia el este. El segmento central de este sistema, situado 1,5 km al oeste del actual centro eruptivo de El Reventador, representa también la superficie de desprendimiento del derrumbe que ha movilizado, hacia el oriente, una gran parte de este antiguo centro eruptivo.

El sector meridional del CVB está cortado por fallas de rumbo NNE-SSW, NE-SW y NW-SE, y se caracteriza por la presencia de altos y bajos estructurales que se encuentran limitados por las fallas NNE-SSW y NE-SW.

Por efecto de un importante episodio tectónico, las lavas más antiguas y el basamento mesozoico se han fracturado en bloques creando un marco morfológico para el sucesivo control que ejercitaron sobre la distribución espacial de las lavas del Volcán Paleoreventador.

En base a la presencia de relictos de declives fluviales en cotas superiores a la 1.600 m, observados en la zona comprendida entre los ríos Malo y Azuela, se supone que un paleorío

Coca fluía más al NW del cauce actual. Esta suposición explicaría también el hecho que el plano de deslizamiento frontal del derrumbe del CVB, todavía visible, esté situado alrededor de la cota 1.600 m y que la masa de escombros volcánicos, movilizándose sobre el basamento sedimentario, haya alcanzado la zona del río Isango ubicado a unos 10 km al SE del río Coca.

Los eventos tectónicos gravitacionales que afectaron al CVB, estuvieron inmediatamente seguidos por una migración hacia el SE del curso del río Coca y por una rápida erosión y profundización de su cauce en más de 500 m. Esto indicaría la presencia de un impulso de levantamiento de la faja subandina que, probablemente, sería el causante de una parte de las deformaciones antes descritas.

Por otro lado, el sector ubicado en la margen derecha del río Coca se caracteriza por un comportamiento tectónico aparentemente más tranquilo. En realidad, las fallas y fracturas que afectan a los depósitos de avalancha de escombros del CVB que han alcanzado este sector, presentan una escala mucho menor que la de las zonas circundantes.

— Volcán Paleoreventador (VPR)

El aparato del Volcán Paleoreventador comenzó a desarrollarse inmediatamente después de que concluyera la fase tectónica, que afectó al Complejo Volcánico Basal.

Las lavas emitidas por el cráter del VPR, cuya posición probablemente coincidía con la del CVB, se canalizaron siguiendo dos direcciones preferenciales: NNE-SSW y E-W. Al no existir pruebas de un control tectónico derivado de morfoestructuras E-W, podría asumirse que esta dirección preferencial esté relacionada con efectos gravitacionales sobre las laderas. En cambio, la dirección NNE-SSW se encuentra parcialmente controlada por la presencia de escarpes de falla orientados NE-SW y NNE-SSW.

El edificio del Volcán Paleoreventador resultó inmediatamente afectado por el reinicio de una actividad tectónica frágil, de tipo esencialmente compresivo. Las familias de fallas NW-SE y NE-SW, que están desarrolladas principalmente sobre el flanco oriental del VPR, representan una manifestación de dicha actividad (Figuras 2 y 4). También este edificio fue afectado por un gran colapso volcano-tectónico en el que la acción de la gravedad fue muy importante. La superficie de desprendimiento estuvo ubicada un poco más al este que la anterior y corresponde con el escarpe que limita el actual anfiteatro a lo largo del cual afloran, localmente, las lavas del CVB.

Los productos de este segundo derrumbe se desplazaron hacia el oriente y alcanzaron el valle del río Coca, obstruyendo su curso y ascendiendo, parcialmente, hasta las laderas de la margen derecha.

La mayor parte de los depósitos de la avalancha se desplazaron a lo largo del valle del río Coca; sobre todo hacia el NE, formando un represamiento que se extendió entre los actuales ríos Malo y Salado.

En fin, se debe notar también que los depósitos del derrumbe del VPR se encuentran localmente afectados por fallas de rumbo NNE-SSW, relacionadas probablemente con una reanudación de los movimientos a lo largo de esta directriz.

— Volcán El Reventador, cono actual (VER)

La disminución de la carga litostática que se produjo como consecuencia del desprendimiento del derrumbe del VPR pudo ser la causa directa que desencadenó la más reciente actividad explosiva.

Los nuevos productos fueron emitidos a través del mismo conducto y utilizaron, como vía preferencial para su descenso, el anfiteatro originado por el derrumbe del VPR. Las coladas de lava y los lahares encontraron como obstáculo en su bajada hacia el río Coca, el alto morfológico ubicado en el borde oriental del anfiteatro, a la altura del cerro Copete (ver Mapa Geológico y corte y-y').

Este rasgo morfológico podría estar relacionado con el mismo mecanismo cinemático responsable de la acumulación del derrumbe, donde el movimiento general de la masa a lo largo

de una superficie listrica produce una mayor acumulación en los sitios en los cuales la misma emerge, o adquiere una inclinación sub-horizontal (Ramsay, 1987).

En base a lo anterior resultaría que, en el ámbito del VER, la mayoría de las fallas distensivas, que son por otro lado muy localizadas, coinciden con la emersión de la superficie de desprendimiento del derrumbe. Tomando en cuenta el fuerte ángulo de inclinación que caracteriza las laderas orientales de El Reventador y la presencia de la depresión que constituye el valle del río Coca, es posible deducir que estas fallas listricas estén relacionadas con el desprendimiento de masas por efectos fundamentalmente gravitacionales antes que por un campo regional de esfuerzos de carácter distensivo. Por lo tanto, en el área del volcán, el régimen tectónico predominante es del tipo compresivo y sólo localmente se forman estructuras secundarias distensivas inducidas. Entonces se puede concluir que, en el Plioceno, no existen evidencias de un cambio del régimen tectónico de compresivo a distensivo, como lo postulan Lara y Chávez (1987).

6. PETROGRAFIA

En el curso de los levantamientos geovulcanológicos fueron recolectadas unas 130 muestras de rocas para los correspondientes análisis petrográficos en láminas delgadas, análisis químicos de microsonda y geoquímicos. Estos análisis se presentan en los Cuadros 6/1, 6/2, 6/3, 6/4 y 7/1, respectivamente.

Siendo que los productos emitidos por el complejo volcánico El Reventador en el curso de su historia evolutiva son predominantemente lavas que se proyectan en el campo calco-alcalino del diagrama K_2O/SiO_2 , para la clasificación de los tipos litológicos se utilizó la nomenclatura de las series orogénicas basada sobre dicho diagrama (Figura 6).

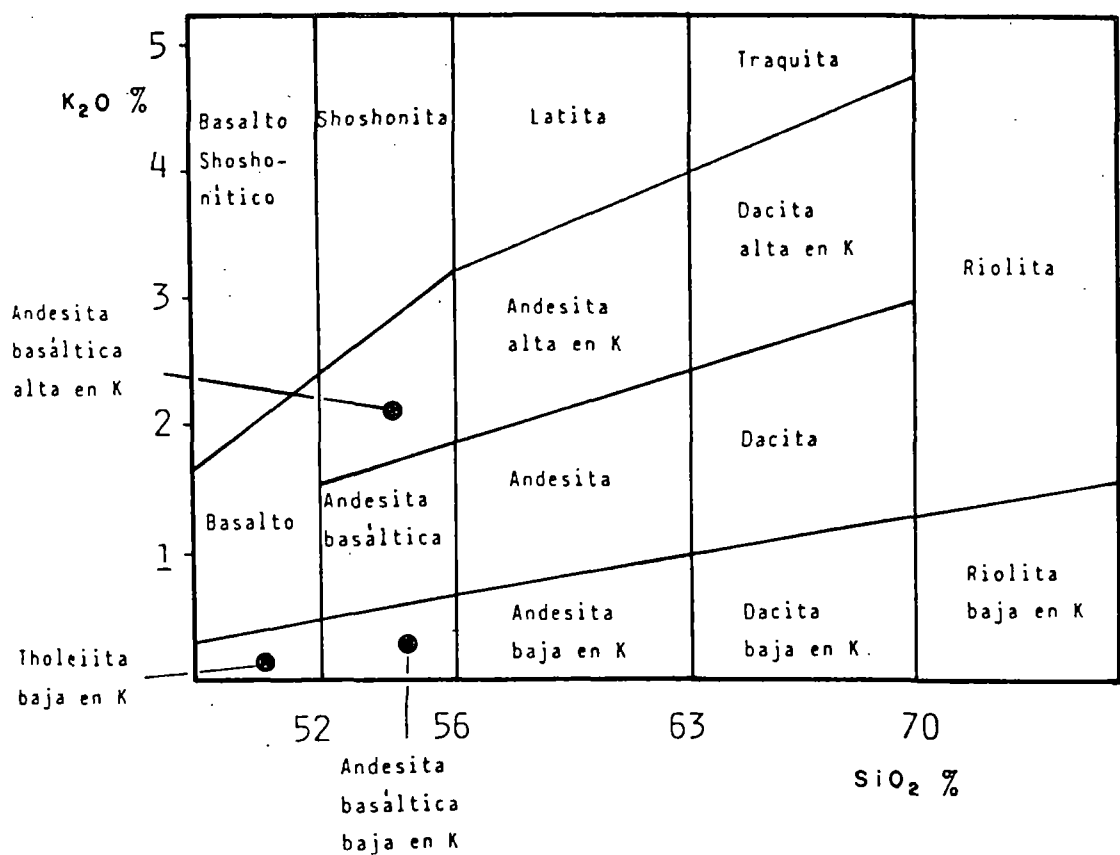


Figura 6.- Nomenclatura de las series orogénicas
Diagrama clasificativo K_2O/SiO_2

Las características petrográficas más significativas de los productos lávicos serán descritos agrupando a los tipos litológicos reconocidos en las tres unidades vulcanológicas presentadas anteriormente y que se refieren a las secuencias estratigráficas reconocidas en el campo; a saber: Complejo Volcánico Basal (CVB), Volcán Paleoreventador (VPR) y Volcán El Reventador (VER).

— Tipos litológicos del Complejo Volcánico Basal

Las lavas del CVB presentan un amplio espectro de variación composicional, puesto que su secuencia varía entre basaltos y riolitas incluyendo andesitas basálticas, andesitas y dacitas. Los términos andesíticos son los más ampliamente representados, mientras las riolitas constituyen los productos más escasos.

• Basaltos

Todos los basaltos evidencian una estructura porfírica.

Los fenocristales están representados por plagioclasa zonada con núcleos bitowníticos y bordes hasta de andesina, olivino y clinopiroxeno, siendo el olivino mucho más abundante que el clinopiroxeno. La magnetita se encuentra generalmente presente en formas de microfenocristales.

La pasta de fondo, cuya textura varía de intergranular a intersertal, incluye, además del vidrio, plagioclasas, piroxenos y opacos. El olivino se presenta sólo esporádicamente.

• Andesitas basálticas

Las andesitas basálticas presentan características estructurales similares a aquellas de los basaltos.

Mineralógicamente se distinguen de las rocas menos evolucionadas por una mayor abundancia de clinopiroxenos y una menor difusión del olivino entre los fenocristales. Este mineral está ausente en los términos más evolucionados, en los cuales pueden aparecer escasos ortopiroxenos.

• Andesitas

Las andesitas presentan estructuras porfíricas o porfírico-seriadas.

La paragénesis de los fenocristales de estas rocas está dominada por la plagioclasa a la cual, constantemente, se asocian clinopiroxeno, ortopiroxeno y cantidades menores de magnetita. El olivino se encuentra esporádicamente presente sólo en los términos con menor contenido de SiO_2 ; este mineral presenta siempre bordes corroídos, clara evidencia de reabsorción, o, en algunos casos, bordes de reacción constituidos por piroxenos.

En las andesitas ricas en SiO_2 también aparece el anfíbol representado por una homblenda pleocroica, de color verde marrón, y, generalmente, con bordes opacíticos.

Frecuentemente se encuentran glomerófilos constituidos por agregados de piroxenos, plagioclasas y magnetita. Algunas veces también se evidencia una homblenda ubicada en la parte central del agregado.

La plagioclasa presenta amplios bandeamientos con núcleos básicos inestables caracterizados por una textura "tipo cedazo"; los contenidos en An, determinados mediante análisis con microsonda electrónica, están comprendidos entre 86 y 72%. Las partes más grandes de la plagioclasa presentan frecuentemente un bandeamiento oscilante (An entre 64 y 54%) con bordes que llegan hasta An 50% (Figura 6).

El clinopiroxeno augítico, que es el mineral máfico más abundante, presenta una composición bastante homogénea (An 43-45%, Fs 12-15%, Wo 41-43%). El ortopiroxeno presenta una composición broncítico-hipersténica.

También la magnetita presenta una composición poco variable; en efecto, los contenidos en ulvo-espinela (Usp), computados según el método de Storer (1983), varían entre 23 y 27%.

La homblenda es rica en Ca y presenta, a veces, relaciones $\text{FeO}/\text{MgO} = 1$, aproximadamente, mientras que, en otros casos, se evidencia un marcado bandeamiento con núcleos más ricos en FeO ($\text{FeO}/\text{MgO} = 1,17 - 1,20$) respecto a los bordes ($\text{FeO}/\text{MgO} = 0,85 - 0,90$). Consecuentemente, los núcleos de anfíbol estarían en desequilibrio respecto al magma que los contiene.

El olivino, cuando está presente, muestra un bandeamiento normal con núcleos más ricos en magnesio (Fo 71-72%) y bordes relativamente enriquecidos en Fa (66-68%).

Las pastas contienen, generalmente, poco vidrio y están caracterizadas por la asociación de los minerales anhidros presentes en los fenocristales.

Los datos microanalíticos de los fenocristales de las andesitas del CVB están resumidos en la Figura 7.

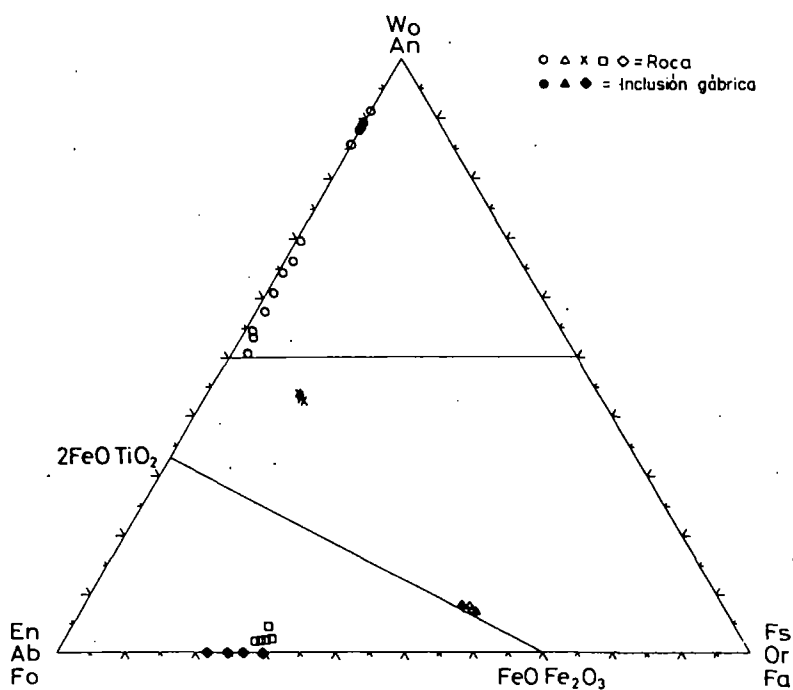
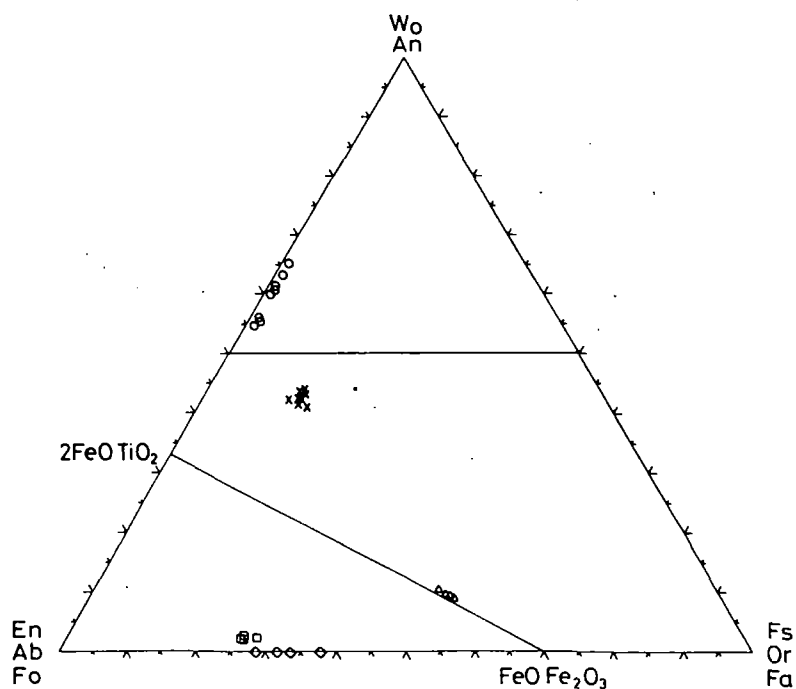


Figura 7.- Andesitas del Complejo Volcánico Basal
Composición química de los fenocristales

Entre las lavas andesíticas de esta secuencia se encuentran inclusiones de rocas intrusivas que fueron analizadas tanto para los elementos mayores, como para las fases individuales. Se trata de un gabro con homblenda en el cual también están presentes un olivino zonado (Fo 79-70%; 1,4% en volumen) y magnetita (Usp 22%; 3,6% en volumen). El olivino se presenta fuertemente redondeado y evidencia, también, concrecimientos simplectíticos con magnetita pobre en TiO_2 (Usp 12%). La plagioclasa está ligeramente bandeada y es moderadamente básica (An 91-87%) con algunos bordes hasta An 80%. La homblenda presenta una variación composicional con bordes relativamente enriquecidos en FeO ; en efecto, el valor de la relación FeO/MgO pasa de 0,91 en los bordes, a 0,5 en los núcleos (Figura 7).

- Dacitas y riolitas

En las dacitas y riolitas todavía se observa una textura porfírica.

La plagioclasa sigue siendo el mineral más abundante, seguido por la homblenda, el ortopiroxeno y poca magnetita. El clinopiroxeno se encuentra presente solo ocasionalmente. El ortopiroxeno disminuye paulatinamente al aumentar el grado de evolución hasta desaparecer en las rocas más ricas en sílice, en las que está también, esporádicamente, presente la biotita. El cuarzo no fue jamás observado.

La persistencia de las fases mineralógicas en fenocristales de las diferentes lavas del Complejo Volcánico Basal, está reportada esquemáticamente en la Figura 8.

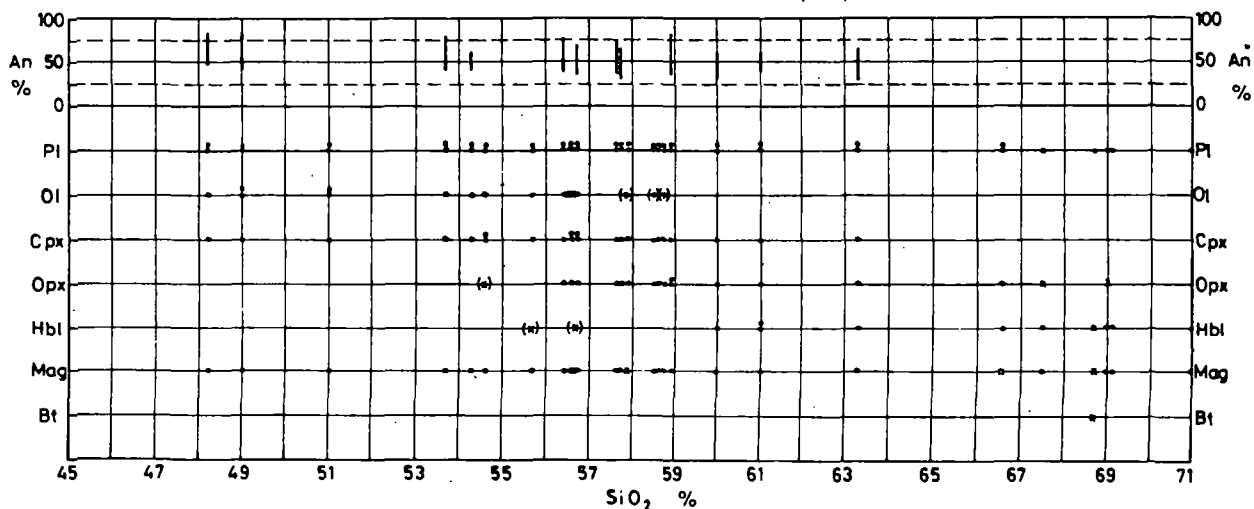


Figura 8.- Lavas del Complejo Volcánico Basal
Diagrama de persistencia de las fases en fenocristales

— Tipos litológicos del Volcán Paleoreventador

Las lavas del VPR muestran una variación más limitada respecto a las de la unidad anterior; en efecto están representadas sólo por basaltos, andesitas basálticas y andesitas que constituyen el tipo litológico más difundido.

- Basaltos

Los basaltos presentan una estructura porfírica

Los fenocristales están representados por plagioclasa y olivino; el clinopiroxeno se encuentra también presente aunque en menor cantidad.

La plagioclasa se presenta generalmente bandeada con núcleos muy básicos (An 94-89%) y fajas con zonación generalmente directa (An 85-80%); también están presentes delgadas zonas marginales que llegan hasta la labradorita (An 62%).

El olivino también se presenta bandeado, evidenciándose núcleos con Fo 77-80% y partes exteriores que pasan gradualmente de Fo 75 a Fo 71%.

El clinopiroxeno está solo ligeramente bandeado con delgados bordes relativamente más ricos en FeO (Fs 16%) respecto a las partes centrales que resultan bastante homogéneas.

Los microfenocristales de magnetita son escasos. Este mineral relativamente pobre en TiO_2 , está claramente más difundido en la pasta en la cual se observan los mismos minerales que forman los fenocristales, pero con relaciones entre clinopiroxeno y olivino totalmente invertidas respecto a la de los fenocristales, siendo el clinopiroxeno menos abundante respecto al olivino.

Los glomerófiros, constituidos generalmente, por plagioclasa, piroxeno y opacos, son relativamente frecuentes. En ocasiones, se evidencian algunos fenocristales con borde opacítico y una longitud máxima de 5 mm, constituidos por agregados de plagioclasa, clinopiroxeno y opacos entre los cuales permanecen reconocibles áreas formadas por anfíbol. Se trata probablemente de relictos de homblenda en vías de transformación y de re-equilibrio.

Los datos microanalíticos de los fenocristales de los basaltos del VPR, están resumidos en la Figura 9.

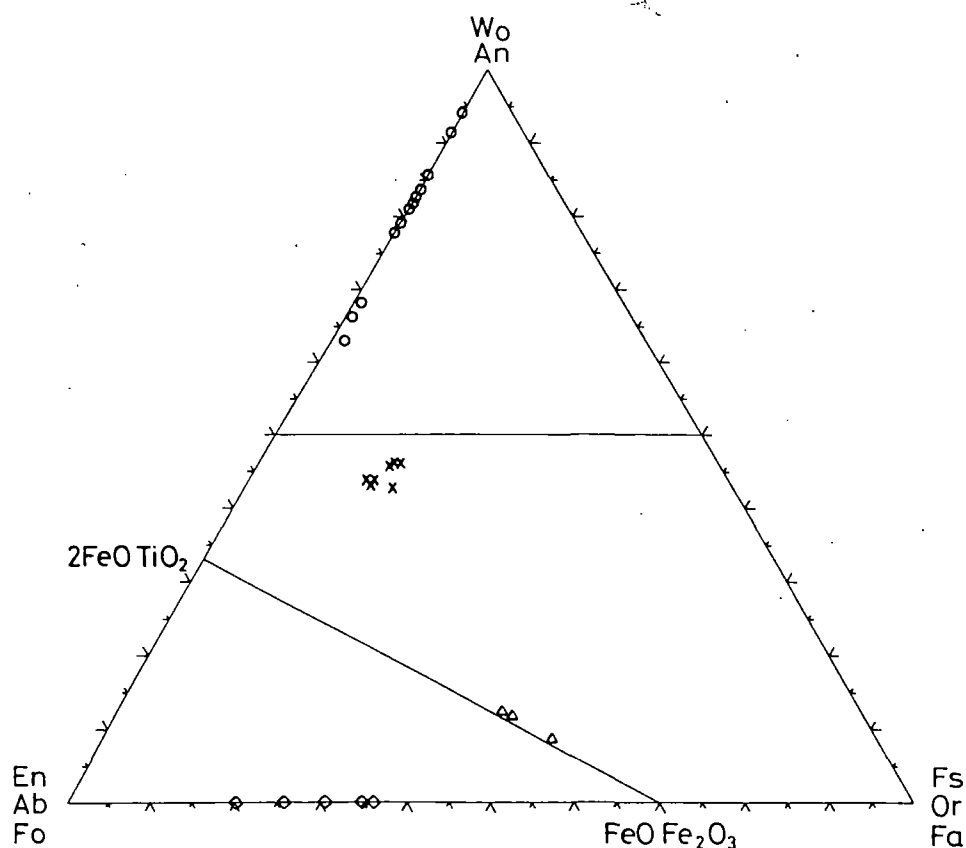


Figura 9.- Basaltos del Volcán Paleoreventador
Composición química de los fenocristales

- Andesitas basálticas

En las andesitas basálticas se observa la misma paragénesis de los basaltos, con un incremento de la relación clinopiroxeno/olivino.

- Andesitas

En las andesitas se nota una neta variación de la paragénesis de los fenocristales. En efecto, en estas rocas que están todavía dominadas por la plagioclasa, aparece la hornblenda que se torna siempre más difundida según se incremente el grado de evolución paralelamente al ortopiroxeno y al clinopiroxeno.

El olivino, siempre muy estable, es frecuente, aunque en pequeñas cantidades, sobre todo en las andesitas pobres en SiO₂.

La plagioclasa evidencia núcleos de labradorita básica (An 66-62%), fajas intermedias a menudo con variaciones de composición oscilantes (An 57-52%) y pocos bordes andesinicos (An 46%).

Los piroxenos muestran composiciones relativamente constantes; el clinopiroxeno tiene una composición augítica (En 43-42%, Fs 15-13%); el ortopiroxeno presenta la composición de una bronzita rica en FeO (En 73-70%).

La magnetita se presenta moderadamente rica en TiO_2 (Usp 29%).

Los datos microanalíticos de los fenocristales de las andesitas del VPR están resumidos en la Figura 10.

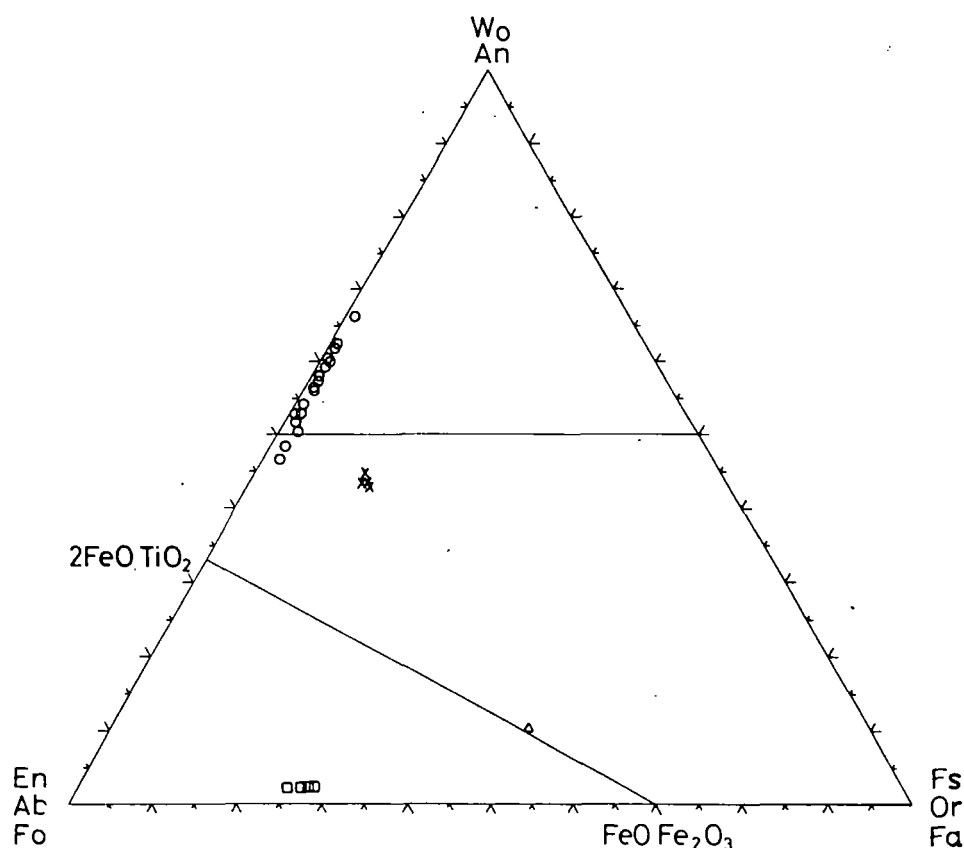


Figura 10.- Andesitas del Volcán Paleoreventador
Composición química de los fenocristales

La pasta se caracteriza por presentar cantidades variables de vidrio que, sólo esporádicamente, se tornan muy abundantes.

En general, los minerales que se asocian en texturas intergranulares o intersertales, están constituidos por plagioclasa, piroxenos y óxidos; en las andesitas ricas en SiO₂ entre los minerales máficos se vuelve dominante el ortopiroxeno.

La persistencia de las fases mineralógicas en fenocristales de las diferentes lavas del Volcán Paleoreventador, está reportada esquemáticamente en la Figura 11.

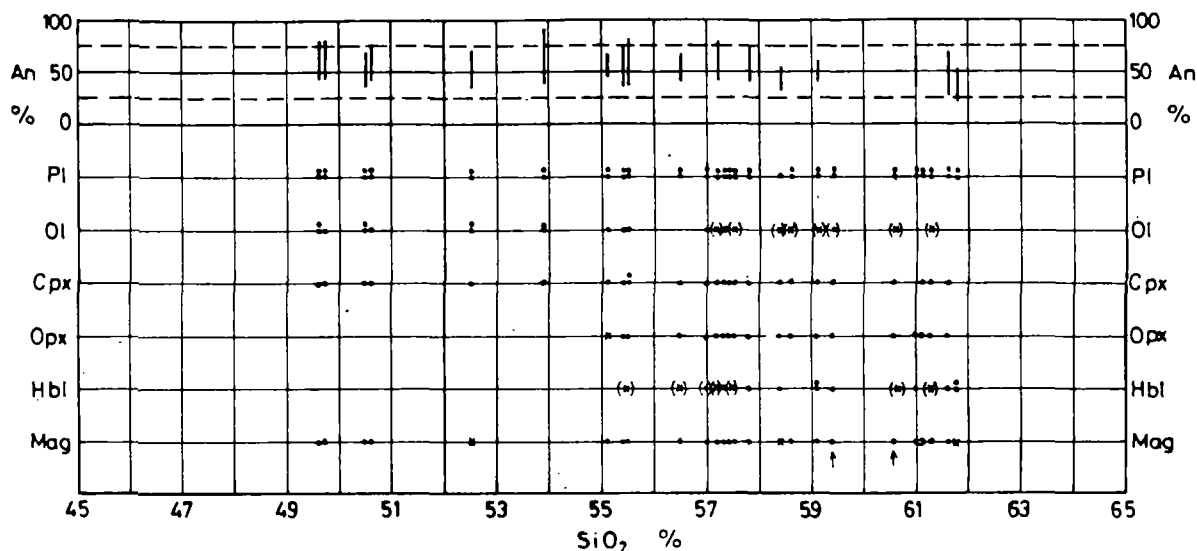


Figura 11.- Lavas del Volcán Paleoreventador
Diagrama de persistencia de las fases en fenocristales

Del examen de los respectivos diagramas de persistencia, se puede concluir que las lavas del VPR presentan, en general, características similares a las del CVB. La principal diferencia está constituida por la difusión de la hornblenda que se vuelve estable en las andesitas ricas en SiO₂.

— Tipos litológicos del Volcán El Reventador

El espectro composicional de las lavas del cono actual es relativamente limitado. En efecto, su variación está comprendida entre basaltos, andesitas basálticas y andesitas ligeramente evolucionadas.

• Basaltos

Estas rocas presentan una estructura porfirica con fenocristales de plagioclasa, olivino y clinopiroxeno; la magnetita es poco abundante. La hornblenda está presente, aunque en forma esporádica, con amplios bordes opacíticos y claras evidencias de reabsorción que se manifiestan, sobre todo, en los perfiles de corrosión.

Se encuentran también algunos agregados granulares de plagioclasa, piroxeno y opacos que contienen relictos de hornblenda. La pasta incluye abundante vidrio en el que están inmersos cristales de plagioclasa, piroxeno, opacos y, en menor cantidad, olivino.

La plagioclasa es bandeada y presenta núcleos básicos, generalmente corroídos, con textura "tipo cedazo" de composición bitownítica (An 89-80%). A través de una discontinuidad composicional, los bordes pasan a una composición labradorítica con bandas también oscilantes (An 55-61%).

El clinopiroxeno presenta una composición que está sobre el límite entre salitas y augitas cálcicas; los bordes se caracterizan por una ligera tendencia hacia un enriquecimiento en hierro. En ocasiones, se evidencian unos pocos núcleos de ortopiroxeno, casi totalmente transformados en clinopiroxeno.

El olivino es inestable y presenta una composición poco variable alrededor de Fo 72-75%.

También la magnetita es relativamente homogénea (Usp 30-35%).

Los datos microanalíticos de los fenocristales de los basaltos del VER, están resumidos en la Figura 12.

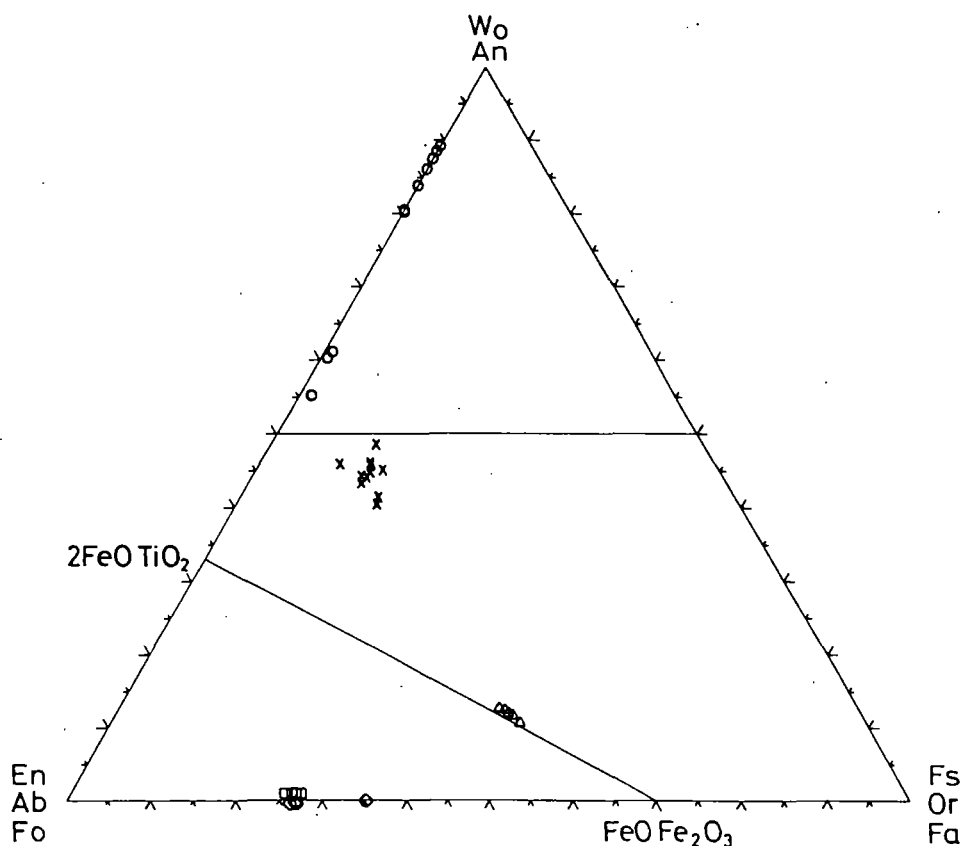


Figura 12.- Basaltos del Volcán El Reventador
Composición química de los fenocristales

- Andesitas basálticas

La asociación plagioclasa-clinopiroxeno, junto con cantidades menores de olivino y magnetita, domina también las andesitas basálticas.

El ortopiroxeno está frecuentemente presente en el núcleo del clinopiroxeno y el olivino aparece siempre reabsorbido.

La hornblenda, en general, se presenta transformada en agregados de minerales anhidros o con aureolas opácitas y bordes fuertemente redondeados.

- Andesitas

Las andesitas evidencian una estructura porfírica. La paragénesis de los fenocristales se caracteriza por el predominio de plagioclasa zonada, clinopiroxeno y ortopiroxeno; este último resulta más abundante en las rocas con más alto contenido de SiO₂. La asociación de los fenocristales se completa con la presencia de magnetita, poca hornblenda y, esporádicamente, olivino. En todas estas rocas se observan evidentes indicios de un desequilibrio mineralógico, representado por:

— Núcleos de ortopiroxeno en reacción con el clinopiroxeno.

- Presencia, en todas las muestras, de olivino estable con frecuentes aureolas de reacción de piroxenos.
- Presencia de relictos de hornblenda en vías de transformación en una asociación de plagioclasa, piroxenos y opacos.
- Presencia de un anfíbol con bordes opacíticos, redondeados y, a veces, corroído.

La plagioclasa evidencia un marcado bandeamiento; en algunas muestras se observa un claro salto composicional entre núcleos básicos corroídos y reabsorbidos y bordes intermedios. Los contenidos de An varían entre 66-67% y 47-48%, con oscilaciones en el intervalo An 56-52%.

El clinopiroxeno, de composición augítica cálcica, presenta bordes ligeramente empobrecidos en Wo; el ortopiroxeno es una broncita férrica.

Los datos microanalíticos de los fenocristales de las andesitas del VER, están resumidos en la Figura 13.

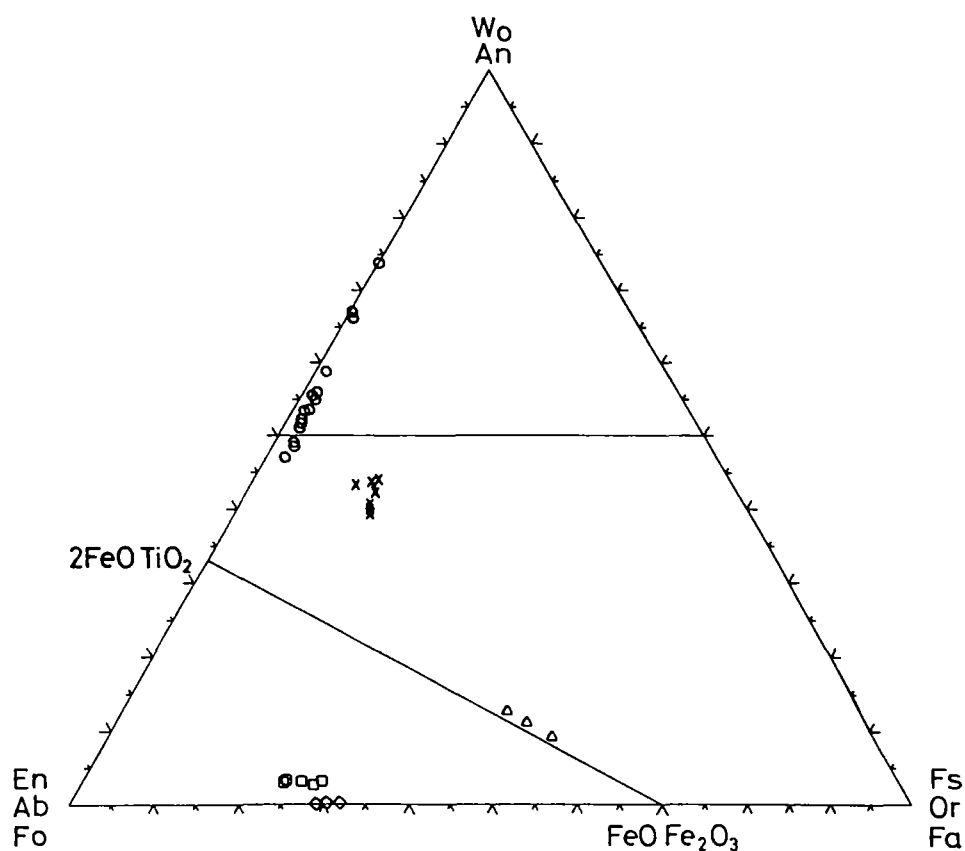


Figura 13.- Andesitas del Volcán El Reventador
Composición química de los fenocristales

La persistencia de las fases mineralógicas en fenocristales, de las diferentes lavas del Volcán El Reventador, está representada esquemáticamente en la Figura 14.

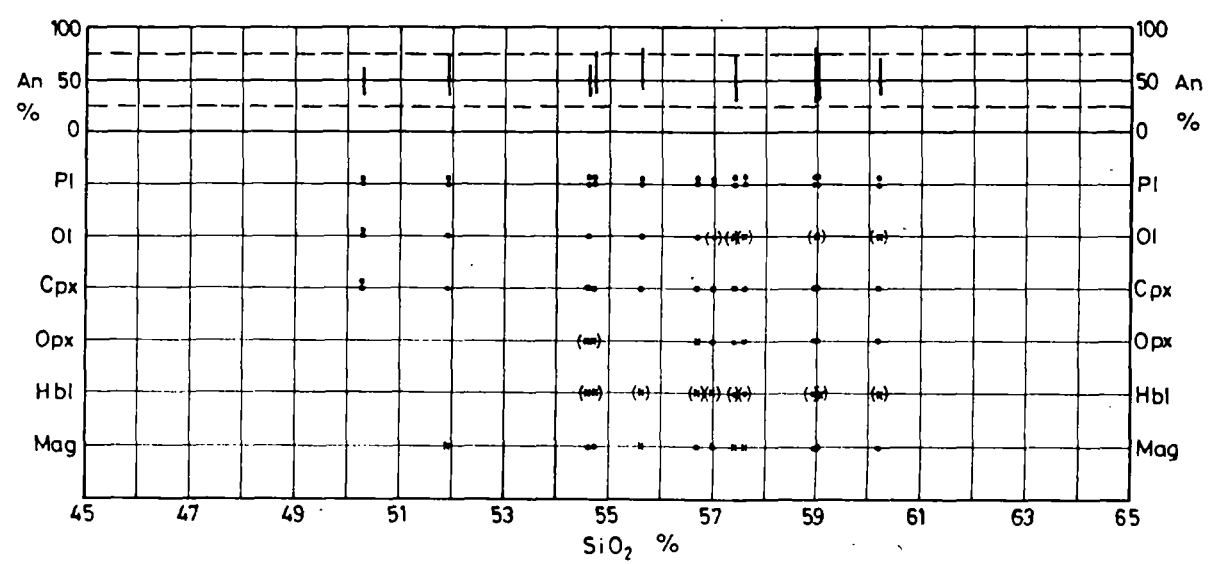


Figura 14.- Lavas del Volcán El Reventador
Diagrama de persistencia de las fases en fenocristales

La persistencia de las fases mineralógicas en fenocristales en el ámbito de todos los productos del complejo volcánico El Reventador, está representada en el diagrama resumen de la Figura 15.

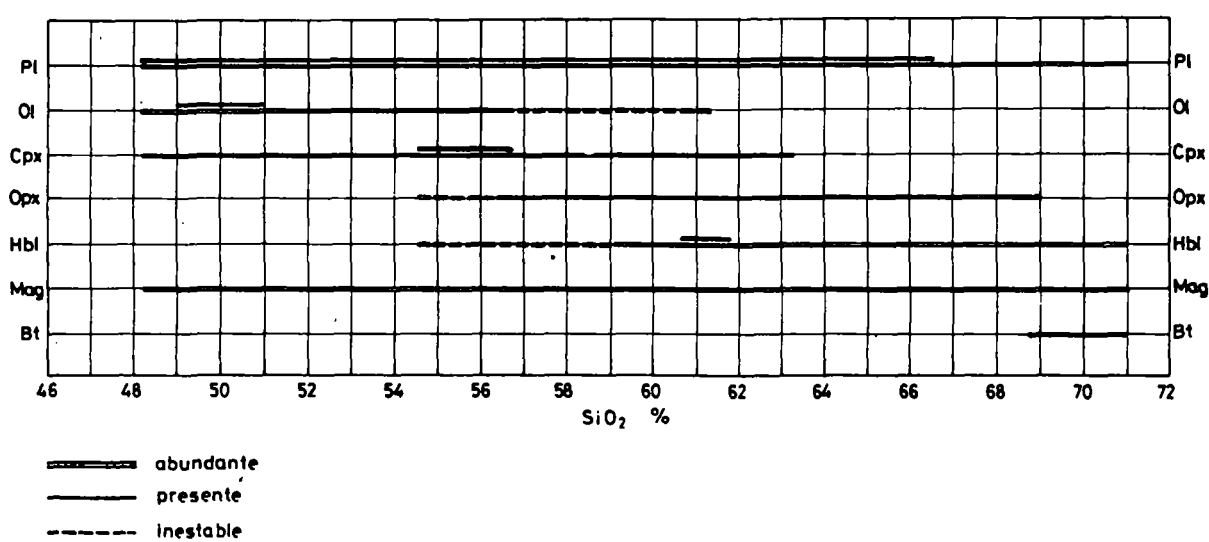


Figura 15.- Lavas del Complejo Volcánico El Reventador
Diagrama resumen de persistencia de las fases
en fenocristales

En los cuadros 6/1, 6/2 y 6/3 están sintetizadas las principales determinaciones petrográficas obtenidas del análisis de las láminas delgadas de las muestras tomadas en los tres edificios volcánicos.

| PETROGRAFIA DEL COMPLEJO VOLCANICO BASAL (CVB) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|------------|---------|------------|--------------------|-------------|--------------|----|----|-------------------|-----------|----|----|---------|---------|------------|--------|-------------|---------|-----------|----|--------------------|--------------------------|-------------|--|----|---|---|---|---------|-----------------|--------------------|--------------------|
| Muestra N° | Estructura | Textura | Alteración | Fenocristales | | | | | | | | | | | | Pasta | | | | | Otros Minerales | Minerales Secundarios | Inclusiones | Clasificación Química o Petrográfica | | | | | | | | |
| | | | | Minerales Siálicos | | | | | Minerales Máficos | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | Cuarzo | Plagioclasa | | | | Olivino | Orto - Px | Px | Px | Anfibol | Biotita | Fe - Ti-Ox | Vidrio | Plagioclasa | Olivino | Orto - Px | Px | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | % | Anortita (%) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | 20 | 40 | 60 | | | | | | | | | | | | | | | | | 80 | | | | | | | |
| R-18 | PS | IG | ○ | ○ | ● | | | | | | ● | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | BASALTO | | | |
| REV-9 | PO | IG | ○ | ○ | ● | | | | | | ● | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ANDESITA BASICA | | |
| REV-85 | PS | IS | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | DACITA | | |
| REV-86 | PS | IS | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ANDESITA ACIDA | | |
| REV-87 | PO | SC | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | BASALTO | | |
| REV-88 | PS | IS | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ANDESITA | | |
| REV-91 | PO | IS | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ANDESITA | | |
| REV-93 | PO | IG | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ANDESITA | | |
| REV-102 | PS | IS | ⊕ | ○ | ○ | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | DACITA | | |
| REV-103 | PS | IS | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | DACITA | |
| REV-104 | PO | IS | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | DACITA | |
| REV-110 | PS | IG | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ANDESITA BASICA | |
| REV-112 | PO | IS | ○ | ○ | ● | | | | | | ⊕ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ANDESITA BASICA | |
| REV-114 | PS | IS | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ANDESITA BASALTICA | |
| REV-120 | PO | IG | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ANDESITA BASALTICA | |
| REV-122 | PO | PI | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ANDESITA BASICA | |
| REV-123 | PO | PI | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ANDESITA |
| REV-124 | PO | PI | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ANDESITA BASICA |
| REV-126 | PO | IS | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | DACITA |
| REV-127 | PS | IG | ⊕ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | BASALTO |
| REV-128 | PO | PI | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ANDESITA |
| REV-129 | PO | IS | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | DACITA |
| REV-131 | PO | PI | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | RIOLITA |
| REV-132 | PO | PI | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | DACITA |
| REV-134 | PO | IS | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ANDESITA BASALTICA |
| REV-136 | PO | IS | ○ | ○ | ● | | | | | | ⊕ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ANDESITA BASICA |
| REV-137 | PO | IS | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ANDESITA BASALTICA |
| REV-141 | PO | SC | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ANDESITA BASALTICA |
| REV-142 | PO | PM | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | RIODACITA |
| REV-200 | PO | IS | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ANDESITA |
| REV-201 | PO | IS | ⊕ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ANDESITA |
| REV-202 | PO | IS | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ANDESITA BASALTICA |
| REV-203 | PO | SC | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ANDESITA BASALTICA |

LEYENDA

Estructura y textura

- PO = porfírica
PS = porfírico-seriada
IS = intersertal
IG = intergranular
PI = pilotaxítica
SC = escoriácea
PM = pumícea

Minerales accesorios

Ap = apatita

Presencia de minerales

- = ausente
⊕ = raro
◐ = presente en pequeñas cantidades
◑ = presente en medianas cantidades
◒ = abundante
● = muy abundante

| PETROGRAFIA DEL VOLCAN PALEOREVENTADOR (VPR) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|------------|---------|------------|--------------------|------------------|--------------|--|--|-------------------|-----------|------------|---------|---------|--------------|--------|-------------|---------|-----------|------------|--------------------|--------------------------|-------------|--|---|----|--|---|--------------------|
| Muestra N° | Estructura | Textura | Alteración | Fenocristales | | | | | | | | | | Pasta | | | | | | Otros Minerales | Minerales Secundarios | Inclusiones | Clasificación Química o Petrográfica | | | | | |
| | | | | Minerales Siálícos | | | | | Minerales Máficos | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | Cuerdo | Plagioclasa | | | | Olivino | Orto - Px | Clino - Px | Anfibol | Biotita | Fe - Ti - Ox | Vidrio | Plagioclasa | Olivino | Orto - Px | Clino - Px | | | | | | | | | |
| | | | | | % 20 40 60 80 | Anortita (%) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A-01 | PO | IS | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Ap | | ○ | ANDESITA ACIDA |
| A-02 | PS | IG | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ | BASALTO |
| A-03 | PS | IG | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ | BASALTO |
| R-08 | PO | PI | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Ap | | ○ | ANDESITA ACIDA |
| R-09 | PO | IS | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ | ANDESITA |
| R-10 | PO | IG | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Ap | | ○ | ANDESITA |
| R-11 | PO | IG | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ | BASALTO |
| REV- 2 | PS | IG | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ | ANDESITA BASALTICA |
| REV-11 | PO | IS | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Ap | | ○ | ANDESITA ACIDA |
| REV-28 | PO | PM | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Ap | | ○ | ANDESITA ACIDA |
| REV-45 | PO | IS | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Ap | | ○ | ANDESITA ACIDA |
| REV-58 | PO | IS | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ | ANDESITA BASALTICA |
| REV-49 | PO | IG | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ | ANDESITA |
| REV-51 | PS | IS | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Ap | | ○ | ANDESITA ACIDA |
| REV-57 | PS | IS | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ | ANDESITA |
| REV-61 | PO | IS | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ | ANDESITA BASICA |
| REV-68 | PO | | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ | ANDESITA BASICA |
| REV-92 | PO | IS | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ | ANDESITA BASICA |
| REV-63 | PO | IG | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ | ANDESITA BASALTICA |
| REV-70 | PO | IG | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ | ANDESITA BASICA |
| REV-90 | PO | IG | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ | ANDESITA BASICA |
| REV-94 | PO | IS | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ | ANDESITA ACIDA |
| REV-96 | | | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Ap | | ○ | GABRO |
| REV-100 | PO | IG | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ | BASALTO |

LEYENDA

Estructura y textura

PO = porfirica

PS = porfirico-seriada

IS = intersertal

IG = intergranular

PI = pilotaxítica

SC = escoriácea

PM = pumícea

Minerales accesorios

Ap = apatita

Presencia de minerales

○ = ausente

⊕ = raro

◐ = presente en pequeñas cantidades

◑ = presente en medianas cantidades

◒ = abundante

◓ = muy abundante

| PETROGRAFIA DEL VOLCAN EL REVENTADOR (VER) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|------------|---------|------------|--------------------|-------------|--------------|----|----|---------|-------------------|----|----|---------|---------|------------|--------|-------------|---------|-----------|--------------------|--------------------------|-------------|--|----|----|--------------------|
| Muestra N° | Estructura | Textura | Alteración | Fenocristales | | | | | | | | | | | | Pasta | | | | Otros Minerales | Minerales Secundarios | Inclusiones | Clasificación Química o Petrográfica | | | |
| | | | | Minerales Siálicos | | | | | | Minerales Máficos | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | Cuarzo | Plagioclasa | | | | Olivino | Orto - Px | Px | Px | Anfibol | Biotita | Fe - Ti-Ox | Vidrio | Plagioclasa | Olivino | Orto - Px | | | | | Px | | |
| | | | | | % | Anortita (%) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | 20 | 40 | 60 | | | | | | | | | | | | | | | | | 80 | |
| REV-12 | PO | SC | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ⊕ | ○ | ⊕ | ● | ○ | ⊕ | ○ | ○ | ⊕ | | | ○ | ANDESITA BASALTICA |
| REV-14 | PO | SC | ○ | ○ | ● | | | | | | ⊕ | ○ | ○ | ○ | ○ | ⊕ | ● | ○ | ○ | ○ | ○ | ⊕ | | | ○ | ANDESITA |
| REV-16 | PO | IS | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ⊕ | ○ | ⊕ | ○ | ○ | ○ | ○ | ⊕ | ⊕ | ○ | | | | ⊕ | ANDESITA BASALTICA |
| REV-18 | PO | IS | ○ | ○ | ● | | | | | | ⊕ | ○ | ○ | ⊕ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Ap | | ○ | ANDESITA |
| REV-19 | PO | IS | ○ | ○ | ● | | | | | | ⊕ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ⊕ | ○ | ○ | Ap | | ⊕ | ANDESITA |
| REV-21 | PO | IS | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ⊕ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ⊕ | ○ | | | | ○ | ANDESITA |
| REV-73 | PS | IS | ○ | ○ | ● | | | | | | ⊕ | ○ | ○ | ⊕ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ⊕ | Ap | | | ○ | ANDESITA ACIDA |
| REV-75 | PO | IS | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ⊕ | ○ | ⊕ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | | ⊕ | ANDESITA BASALTICA |
| REV-95 | PS | IS | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ⊕ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | | ○ | BASALTO |
| REV-99 | | | ○ | ○ | ● | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | | ○ | BASALTO |
| | | | ○ | ○ | ○ | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | | ○ | |
| | | | ○ | ○ | ○ | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | | ○ | |

LEYENDA

Estructura y textura

- PO = porfírica
- PS = porfírico-seriada
- IS = intersertal
- IG = intergranular
- PI = pilotaxítica
- SC = escoriácea
- PM = pumícea

Minerales accesorios

Ap = apatita

Presencia de minerales

- = ausente
- ⊕ = raro
- ◐ = presente en pequeñas cantidades
- ◑ = presente en medianas cantidades
- ◒ = abundante
- = muy abundante

CUADRO 6/4

ANALISIS DE MINERALES PERTENECIENTES A ROCAS DEL COMPLEJO VOLCANICO
EL REVENTADOR

| OLIVINOS | | | | | | | MAGNETITAS | | | | |
|----------|--------|--------|---------|---------|---------|--------|------------|--------|-------|---------|---------|
| | A-02-B | A-02-N | Rev14-B | Rev95-B | Rev95-N | Rev9-N | | A-02 | Rev14 | Rev95-B | Rev95-N |
| SiO2 | 38.82 | 39.53 | 37.29 | 38.35 | 38.58 | 37.43 | TiO2 | 9.89 | 8.50 | 10.87 | 11.87 |
| FeO | 23.48 | 18.63 | 26.35 | 30.33 | 24.46 | 25.91 | Al2O3 | 8.46 | 3.92 | 4.80 | 4.36 |
| MnO | 0.48 | 0.16 | 0.35 | 0.56 | 0.45 | 0.39 | Fe2O3 | 42.67 | 48.04 | 45.14 | 42.90 |
| MgO | 38.58 | 41.72 | 35.98 | 31.31 | 38.06 | 36.45 | FeO | 35.70 | 33.43 | 34.68 | 37.10 |
| Tot | 101.34 | 100.04 | 99.97 | 100.55 | 101.55 | 100.18 | MgO | 4.07 | 3.42 | 4.52 | 3.73 |
| | | | | | | | Tot | 100.79 | 97.31 | 100.01 | 99.96 |
| Si | 1.000 | 1.006 | 0.990 | 1.028 | 0.997 | 0.998 | | | | | |
| Fe | 0.506 | 0.396 | 0.585 | 0.680 | 0.528 | 0.572 | Ti | 0.261 | 0.238 | 0.293 | 0.323 |
| Mn | 0.010 | 0.003 | 0.007 | 0.012 | 0.009 | 0.008 | Al | 0.350 | 0.172 | 0.203 | 0.186 |
| Mg | 1.481 | 1.584 | 1.424 | 1.251 | 1.467 | 1.436 | Fe3+ | 1.128 | 1.347 | 1.218 | 1.168 |
| Tot | 2.997 | 2.898 | 3.006 | 2.971 | 3.001 | 3.005 | Fe2+ | 1.048 | 1.042 | 1.040 | 1.122 |
| | | | | | | | Mg | 0.213 | 0.190 | 0.242 | 0.201 |
| Fe | 74.53 | 80.00 | 70.88 | 64.79 | 73.53 | 71.51 | Tot | 3.000 | 2.989 | 2.996 | 3.000 |
| Fa | 25.47 | 20.00 | 29.12 | 35.21 | 26.47 | 28.49 | | | | | |
| | | | | | | | Usp | 33.53 | 25.20 | 30.83 | 35.20 |

| CLINOPIROXENOS | | | | | | | ORTHOPIROXENOS | | | | |
|----------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|----------------|---------|--------|---------|---------|
| | A-02-B | A-02-N | Rev14-B | Rev14-N | Rev95-B | Rev95-N | Rev9-N | Rev28-N | Rev9-B | Rev28-B | Rev28-B |
| SiO2 | 48.33 | 49.84 | 52.37 | 49.88 | 52.23 | 48.62 | 52.28 | 52.75 | 54.27 | 53.82 | 54.00 |
| TiO2 | 1.08 | 0.97 | 0.57 | 1.07 | 0.93 | 1.03 | 0.35 | 0.51 | 0.26 | 0.34 | 0.19 |
| Al2O3 | 6.54 | 6.97 | 1.99 | 4.22 | 1.44 | 6.88 | 2.25 | 1.70 | 0.63 | 0.93 | 0.52 |
| Fe2O3 | 1.49 | 0.05 | 0.81 | 1.43 | 0.06 | 1.46 | 0.16 | 0.12 | 0.16 | 0.25 | 0.30 |
| FeO | 8.21 | 7.67 | 6.92 | 7.54 | 10.18 | 6.28 | 7.44 | 8.19 | 16.30 | 17.49 | 17.44 |
| MnO | | | 0.38 | | 0.31 | | 0.22 | 0.21 | 0.73 | 0.53 | 0.61 |
| MgO | 12.68 | 13.95 | 15.41 | 14.03 | 15.00 | 13.08 | 15.68 | 15.04 | 26.01 | 25.28 | 25.44 |
| CaO | 21.47 | 20.12 | 21.08 | 20.99 | 19.64 | 22.86 | 20.54 | 21.28 | 1.04 | 1.31 | 1.15 |
| Na2O | 0.24 | 0.47 | 0.37 | 0.39 | 0.20 | 0.18 | 0.21 | 0.24 | | | |
| Tot | 100.04 | 100.04 | 99.90 | 99.55 | 99.99 | 100.39 | 99.13 | 100.04 | 99.76 | 99.95 | 99.65 |
| Si | 1.803 | 1.836 | 1.937 | 1.861 | 1.948 | 1.793 | 1.945 | 1.955 | 1.976 | 1.965 | 1.977 |
| Ti | 0.030 | 0.027 | 0.016 | 0.030 | 0.026 | 0.029 | 0.010 | 0.014 | 0.007 | 0.009 | 0.005 |
| Al(IV) | 0.197 | 0.163 | 0.063 | 0.139 | 0.052 | 0.207 | 0.055 | 0.045 | 0.024 | 0.035 | 0.023 |
| Al(VI) | 0.091 | 0.140 | 0.024 | 0.047 | 0.012 | 0.092 | 0.044 | 0.029 | 0.003 | 0.006 | |
| Fe3+ | 0.042 | 0.001 | 0.023 | 0.040 | 0.002 | 0.041 | 0.004 | 0.003 | 0.004 | 0.007 | 0.008 |
| Fe2+ | 0.256 | 0.236 | 0.214 | 0.235 | 0.317 | 0.194 | 0.231 | 0.254 | 0.496 | 0.534 | 0.534 |
| Mn | | | 0.012 | | 0.010 | | 0.007 | 0.007 | 0.023 | 0.016 | 0.019 |
| Mg | 0.705 | 0.767 | 0.850 | 0.780 | 0.834 | 0.719 | 0.870 | 0.831 | 1.412 | 1.376 | 1.389 |
| Ca | 0.858 | 0.795 | 0.835 | 0.839 | 0.785 | 0.903 | 0.819 | 0.845 | 0.055 | 0.051 | 0.045 |
| Na | 0.017 | 0.034 | 0.027 | 0.028 | 0.014 | 0.013 | 0.015 | 0.017 | | | |
| Wo | 46.11 | 44.17 | 43.47 | 44.28 | 40.50 | 48.65 | 42.55 | 43.71 | 2.78 | 2.60 | 2.28 |
| En | 37.89 | 42.61 | 44.22 | 41.18 | 43.04 | 38.73 | 45.19 | 42.98 | 71.76 | 69.91 | 70.27 |
| Fs | 16.01 | 13.21 | 12.31 | 14.54 | 16.46 | 12.62 | 12.26 | 13.31 | 25.46 | 27.49 | 27.44 |

CUADRO 6/4

ANÁLISIS DE MINERALES PERTENECIENTES A ROCAS DEL COMPLEJO VOLCANICO
EL REVENTADOR

HORNBLENDAS

PLAGIOCLASAS

| | Rev14 | Rev86-N | Rev9 | | Rev95-B | Rev95-N | A-02-B | A-02-N | A-02-N | Rev14-B | Rev14-N |
|--------------------------------|--------|---------|--------|--------------------------------|---------|---------|--------|--------|--------|---------|---------|
| SiO ₂ | 41.88 | 46.46 | 43.77 | SiO ₂ | 52.21 | 46.11 | 51.40 | 48.66 | 46.87 | 54.91 | 50.23 |
| TiO ₂ | 2.55 | 2.12 | 3.01 | Al ₂ O ₃ | 28.95 | 33.81 | 30.50 | 32.71 | 33.11 | 26.68 | 30.42 |
| Al ₂ O ₃ | 12.99 | 11.10 | 11.57 | FeO | 0.65 | 0.38 | 0.62 | 0.46 | 0.58 | 0.53 | 0.50 |
| FeO | 11.37 | 12.97 | 13.12 | CaO | 11.81 | 17.20 | 12.87 | 14.88 | 16.44 | 9.20 | 12.85 |
| MgO | 14.87 | 13.59 | 13.22 | Na ₂ O | 4.30 | 1.44 | 3.79 | 2.52 | 1.91 | 5.83 | 3.69 |
| CaO | 11.80 | 10.76 | 10.93 | K ₂ O | 0.12 | | 0.11 | | | 0.34 | |
| Na ₂ O | 3.01 | 2.08 | 2.27 | Tot | 98.04 | 98.94 | 99.29 | 99.23 | 98.91 | 97.49 | 97.69 |
| K ₂ O | 0.44 | 0.60 | 0.76 | | | | | | | | |
| Tot | 98.91 | 99.68 | 98.65 | Si | 2.414 | 2.143 | 2.353 | 2.239 | 2.177 | 2.537 | 2.336 |
| | | | | Al | 1.577 | 1.851 | 1.645 | 1.773 | 1.812 | 1.452 | 1.667 |
| Si | 6.930 | 6.649 | 6.392 | Fe | 0.024 | 0.014 | 0.023 | 0.017 | 0.022 | 0.020 | 0.019 |
| Ti | 0.287 | 0.228 | 0.330 | Ca | 0.585 | 0.856 | 0.631 | 0.733 | 0.818 | 0.455 | 0.640 |
| Al(IV) | 1.907 | 1.351 | 1.608 | Na | 0.384 | 0.129 | 0.336 | 0.224 | 0.171 | 0.522 | 0.332 |
| Al(VI) | 0.320 | 0.520 | 0.382 | K | 0.006 | | 0.006 | | | 0.019 | |
| Fe | 1.383 | 1.552 | 1.601 | Tot | 4.990 | 4.993 | 4.994 | 4.986 | 5.000 | 5.005 | 4.994 |
| Mg | 3.224 | 2.899 | 2.877 | | | | | | | | |
| Ca | 1.838 | 1.649 | 1.709 | An | 61.28 | 87.52 | 66.16 | 77.62 | 83.49 | 47.11 | 67.16 |
| Na | 0.847 | 0.576 | 0.640 | Ab | 37.98 | 12.48 | 33.17 | 22.38 | 16.51 | 50.82 | 32.84 |
| K | 0.080 | 0.108 | 0.140 | Or | 0.74 | | 0.67 | | | 2.07 | |
| Tot | 15.970 | 15.532 | 15.679 | | | | | | | | |

NOTA:

B = Borde del mineral

N = Núcleo del mineral

La composición de los minerales fue determinada en el Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Siena, mediante un espectrómetro Edax acoplado a un microscopio electrónico Philips.

7. GEOQUIMICA

Los análisis químicos de rocas interesaron 62 muestras representativas del Complejo Volcánico El Reventador (Figura 16). En el Cuadro 7/1 se presentan los resultados de los análisis químicos de rocas (elementos mayores), así como la norma CIPW y el índice de diferenciación (DI). Los elementos mayores fueron determinados por el método de fluorescencia de rayos X (XRF); a excepción del FeO que fue determinado por titulación, el Na₂O y MgO por el método de espectrometría de absorción atómica (AAS) y el H₂O por pérdidas por calcinación.

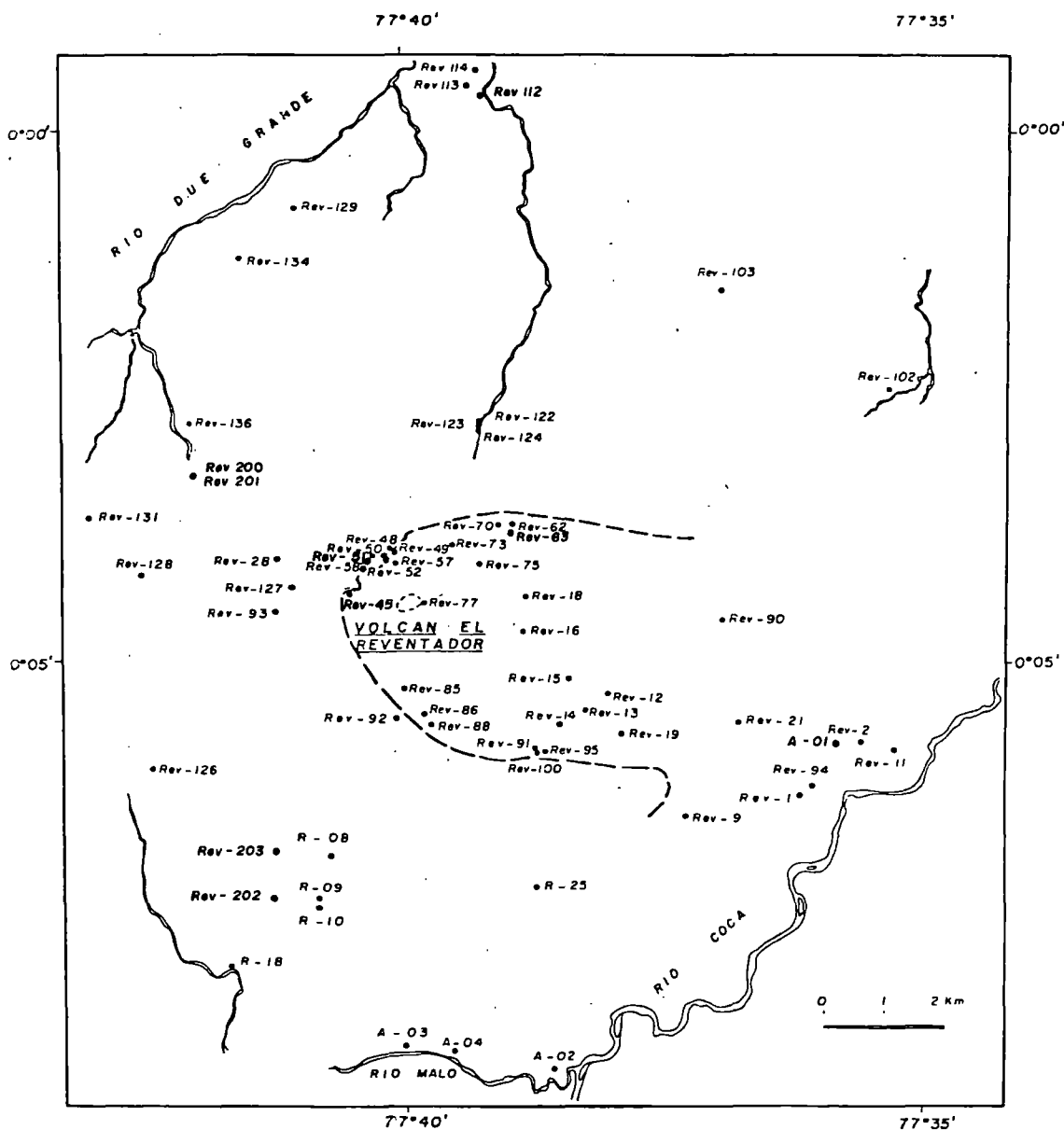


Figura 16.- Esquema de ubicación de las muestras

Estos análisis fueron llevados a cabo en los Laboratorios de Ciencia de la Tierra de la Universidad de Pisa y Siena.

En la Universidad de Siena también se realizaron los análisis de las fases mineralógicas, mediante la utilización de microsonda electrónica; los resultados pertinentes se presentan en el Cuadro 6/4.

7.1 Composición química de los productos volcánicos

Los resultados de los análisis evidencian, en general, una distribución regular de todas las lavas del complejo volcánico El Reventador en el campo calco-alkalino del diagrama K_2O/SiO_2 (Figura 17).

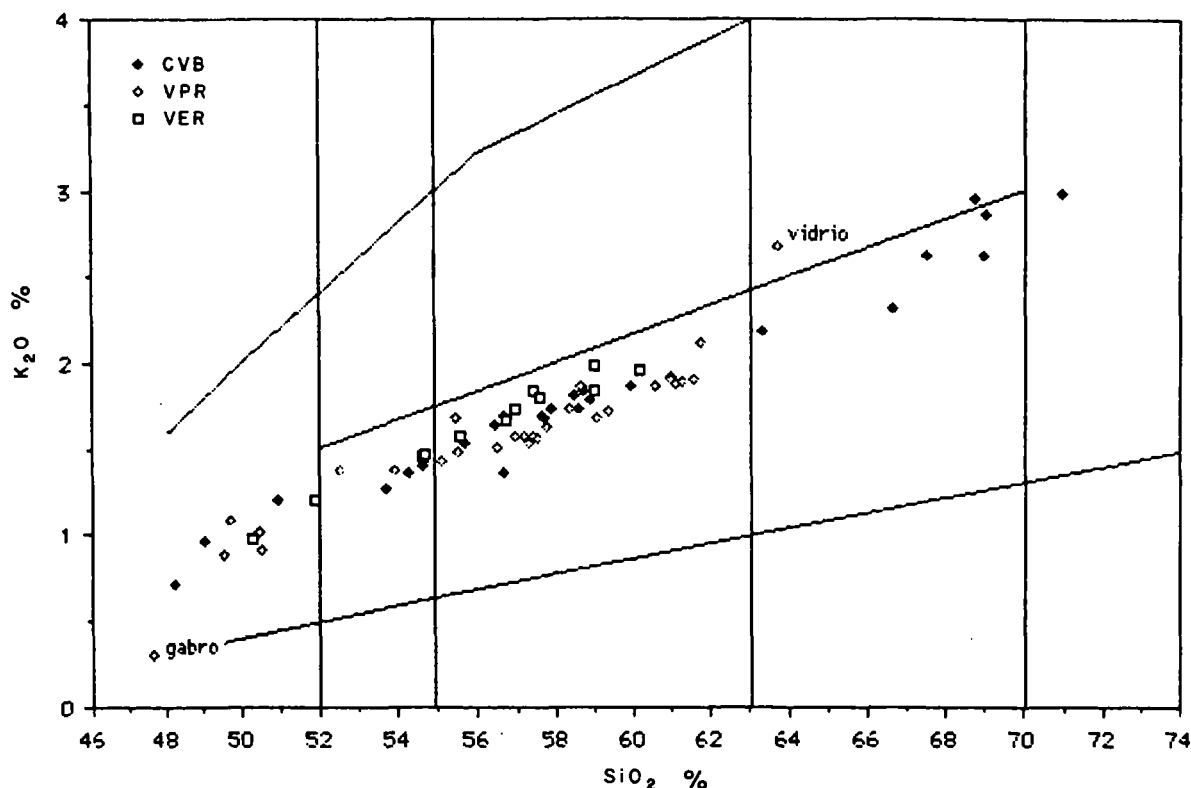


Figura 17.- Lavas del Complejo Volcánico El Reventador
Diagrama K_2O/SiO_2

CUADRO 7/1

ANALISIS QUIMICO DE ROCAS DEL COMPLEJO VOLCANICO EL REVENTADOR
PARTE 1: COMPLEJO VOLCANICO BASAL (CVB)

| MUESTRA | R-18 | Rev-9 | Rev-85 | Rev-86 | Rev-88 | Rev-91 | Rev-93 | Rev-102 | Rev-103 | Rev-112 | Rev-114 | Rev-122 | Rev-123 |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| SiO2 | 48.43 | 56.30 | 62.99 | 60.62 | 59.37 | 57.28 | 56.15 | 68.96 | 66.49 | 56.43 | 54.35 | 57.90 | 58.14 |
| TiO2 | 1.12 | 0.90 | 0.58 | 0.68 | 0.75 | 0.89 | 0.84 | 0.34 | 0.39 | 0.80 | 0.91 | 0.80 | 0.79 |
| Al2O3 | 19.52 | 18.66 | 17.45 | 17.70 | 18.24 | 18.55 | 18.94 | 16.12 | 16.67 | 18.95 | 19.16 | 18.48 | 18.03 |
| Fe2O3 | 2.29 | 2.26 | 1.56 | 2.49 | 2.08 | 2.46 | 2.08 | 1.90 | 2.24 | 2.30 | 2.36 | 2.08 | 2.27 |
| FeO | 7.36 | 4.86 | 3.08 | 3.15 | 3.62 | 4.42 | 4.82 | 0.85 | 1.41 | 4.69 | 5.43 | 4.78 | 4.43 |
| MnO | 0.18 | 0.12 | 0.10 | 0.12 | 0.10 | 0.12 | 0.13 | 0.11 | 0.12 | 0.16 | 0.17 | 0.14 | 0.15 |
| MgO | 6.63 | 3.65 | 2.34 | 2.68 | 3.24 | 3.42 | 4.16 | 0.79 | 1.39 | 3.33 | 3.55 | 2.76 | 3.07 |
| CaO | 9.40 | 6.58 | 4.83 | 5.49 | 5.77 | 6.42 | 6.63 | 2.67 | 3.50 | 6.64 | 7.41 | 6.12 | 6.05 |
| Na2O | 3.26 | 4.27 | 4.37 | 4.57 | 4.41 | 4.23 | 4.04 | 5.28 | 4.83 | 4.24 | 3.96 | 4.19 | 4.46 |
| K2O | 0.96 | 1.68 | 2.17 | 1.91 | 1.85 | 1.67 | 1.63 | 2.62 | 2.32 | 1.68 | 1.40 | 1.73 | 1.80 |
| P2O5 | 0.45 | 0.51 | 0.31 | 0.34 | 0.33 | 0.33 | 0.34 | 0.17 | 0.26 | 0.53 | 0.44 | 0.46 | 0.44 |
| H2O | 0.40 | 0.22 | 0.22 | 0.26 | 0.25 | 0.23 | 0.25 | 0.20 | 0.41 | 0.26 | 0.89 | 0.57 | 0.38 |
| Tot | 100.00 | 100.01 | 100.00 | 100.01 | 100.01 | 100.02 | 100.01 | 100.01 | 100.03 | 100.01 | 100.03 | 100.01 | 100.01 |
| Q | 0.00 | 4.84 | 14.74 | 11.26 | 9.03 | 6.81 | 4.66 | 21.80 | 20.53 | 5.43 | 3.68 | 8.43 | 7.34 |
| Or | 5.67 | 9.93 | 12.82 | 11.29 | 10.93 | 9.87 | 9.63 | 15.48 | 13.71 | 9.93 | 8.27 | 10.22 | 10.64 |
| Ab | 27.58 | 36.13 | 36.98 | 38.67 | 37.31 | 35.79 | 34.18 | 44.67 | 40.87 | 35.88 | 33.51 | 35.45 | 37.74 |
| An | 35.79 | 26.79 | 21.59 | 22.14 | 24.51 | 26.70 | 28.73 | 12.14 | 15.66 | 27.71 | 30.37 | 26.51 | 23.86 |
| C | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.15 | 0.47 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Di | 6.43 | 2.06 | 0.28 | 2.32 | 1.58 | 2.44 | 1.58 | 0.00 | 0.00 | 1.44 | 2.89 | 0.70 | 2.68 |
| Hy | 1.95 | 13.88 | 9.28 | 8.39 | 11.18 | 12.17 | 15.58 | 1.97 | 3.78 | 13.28 | 14.26 | 12.53 | 11.57 |
| Ol | 15.67 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Mt | 3.32 | 3.28 | 2.26 | 3.61 | 3.02 | 3.57 | 3.02 | 2.11 | 3.25 | 3.33 | 3.42 | 3.02 | 3.29 |
| Hm | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.44 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Il | 2.13 | 1.71 | 1.10 | 1.29 | 1.42 | 1.69 | 1.60 | 0.65 | 0.74 | 1.52 | 1.73 | 1.52 | 1.50 |
| Ap | 1.04 | 1.18 | 0.72 | 0.79 | 0.76 | 0.76 | 0.79 | 0.39 | 0.60 | 1.23 | 1.02 | 1.07 | 1.02 |
| Aq | 0.40 | 0.22 | 0.22 | 0.26 | 0.25 | 0.23 | 0.25 | 0.20 | 0.41 | 0.26 | 0.89 | 0.57 | 0.38 |
| Tot | 100.00 | 100.01 | 100.00 | 100.01 | 100.01 | 100.02 | 100.01 | 100.01 | 100.03 | 100.01 | 100.03 | 100.01 | 100.01 |
| DI | 33.26 | 50.90 | 64.54 | 61.22 | 57.28 | 52.46 | 48.47 | 81.96 | 75.11 | 51.24 | 45.46 | 54.10 | 55.71 |

| MUESTRA | Rev-124 | Rev-126 | Rev-127 | Rev-128 | Rev-129 | Rev-136 | Rev-131 | Rev-134 | Rev-200 | Rev-201 | Rev-202 | Rev-203 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| SiO2 | 58.63 | 69.30 | 50.45 | 58.19 | 67.77 | 56.40 | 70.84 | 55.65 | 57.38 | 58.75 | 53.51 | 54.12 |
| TiO2 | 0.77 | 0.34 | 0.99 | 0.73 | 0.36 | 0.66 | 0.24 | 0.87 | 0.75 | 0.76 | 0.81 | 0.99 |
| Al2O3 | 18.25 | 15.85 | 20.70 | 18.49 | 16.62 | 19.63 | 15.65 | 20.54 | 18.70 | 18.39 | 20.78 | 19.50 |
| Fe2O3 | 2.19 | 0.91 | 2.43 | 2.51 | 1.02 | 1.69 | 0.58 | 1.78 | 2.52 | 2.10 | 2.38 | 3.42 |
| FeO | 4.31 | 1.37 | 5.92 | 3.82 | 1.71 | 4.66 | 1.16 | 4.42 | 3.98 | 4.08 | 4.63 | 4.59 |
| MnO | 0.15 | 0.12 | 0.16 | 0.15 | 0.11 | 0.19 | 0.05 | 0.15 | 0.14 | 0.13 | 0.17 | 0.17 |
| MgO | 2.71 | 0.59 | 4.33 | 3.33 | 0.81 | 2.59 | 0.36 | 2.50 | 3.45 | 3.12 | 3.08 | 3.03 |
| CaO | 6.03 | 1.95 | 8.42 | 6.17 | 2.71 | 6.64 | 1.84 | 7.43 | 6.59 | 6.11 | 8.47 | 7.78 |
| Na2O | 4.29 | 5.39 | 4.37 | 4.18 | 5.14 | 4.82 | 5.70 | 4.13 | 4.17 | 4.20 | 3.88 | 4.12 |
| K2O | 1.84 | 2.87 | 1.20 | 1.72 | 2.63 | 1.36 | 2.97 | 1.53 | 1.69 | 1.79 | 1.27 | 1.37 |
| P2O5 | 0.44 | 0.12 | 0.51 | 0.44 | 0.17 | 0.67 | 0.10 | 0.41 | 0.45 | 0.39 | 0.49 | 0.38 |
| H2O | 0.41 | 1.18 | 0.53 | 0.27 | 0.95 | 0.71 | 0.51 | 0.61 | 0.18 | 0.17 | 0.53 | 0.55 |
| Tot | 100.02 | 99.99 | 100.01 | 100.00 | 100.00 | 100.02 | 100.00 | 100.02 | 100.00 | 99.99 | 100.00 | 100.02 |
| Q | 9.01 | 21.60 | 0.00 | 8.77 | 20.40 | 4.18 | 21.54 | 5.04 | 7.26 | 9.04 | 2.92 | 4.02 |
| Or | 10.87 | 16.96 | 7.09 | 10.16 | 15.54 | 8.04 | 17.55 | 9.04 | 9.99 | 10.58 | 7.50 | 8.10 |
| Ab | 36.30 | 45.61 | 35.77 | 35.37 | 43.49 | 40.78 | 48.23 | 34.94 | 35.28 | 35.54 | 32.83 | 34.86 |
| An | 25.11 | 8.89 | 33.32 | 26.61 | 12.33 | 27.91 | 8.35 | 32.99 | 27.32 | 26.04 | 35.53 | 30.67 |
| Ne | 0.00 | 0.00 | 0.65 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| C | 0.00 | 0.62 | 0.00 | 0.00 | 0.80 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Di | 1.59 | 0.00 | 4.18 | 0.91 | 0.00 | 0.54 | 0.11 | 0.98 | 1.97 | 1.40 | 2.69 | 4.43 |
| Hy | 11.08 | 2.89 | 0.00 | 11.87 | 3.92 | 12.61 | 2.19 | 11.23 | 11.88 | 11.83 | 11.87 | 9.68 |
| Ol | 0.00 | 0.00 | 11.87 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Mt | 3.18 | 1.32 | 3.52 | 3.64 | 1.48 | 2.45 | 0.84 | 2.58 | 3.65 | 3.04 | 3.45 | 4.96 |
| Il | 1.46 | 0.65 | 1.88 | 1.39 | 0.68 | 1.25 | 0.46 | 1.65 | 1.42 | 1.44 | 1.54 | 1.88 |
| Ap | 1.02 | 0.28 | 1.18 | 1.02 | 0.39 | 1.55 | 0.23 | 0.95 | 1.04 | 0.90 | 1.13 | 0.88 |
| Aq | 0.41 | 1.18 | 0.53 | 0.27 | 0.95 | 0.71 | 0.51 | 0.61 | 0.18 | 0.17 | 0.53 | 0.55 |
| Tot | 100.02 | 99.99 | 100.01 | 100.00 | 100.00 | 100.02 | 100.00 | 100.02 | 100.00 | 99.99 | 100.00 | 100.02 |
| DI | 56.18 | 84.16 | 43.51 | 54.30 | 79.44 | 53.00 | 87.31 | 49.03 | 52.52 | 55.15 | 43.26 | 46.98 |

CUADRO 7/1

ANALISIS QUIMICO DE ROCAS DEL COMPLEJO VOLCANICO EL REVENTADOR
PARTE 2: VOLCAN PALEOREVENTADOR (VPR)

| MUESTRA | A-01 | A-02 | A-03 | A-04 | R-08 | R-09 | R-10 | R-25 | Rev-1 | Rev-2 | Rev-11 | Rev-28 | Rev-45 |
|---------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| SiO2 | 61.34 | 49.29 | 50.02 | 56.87 | 61.37 | 56.39 | 56.93 | 60.92 | 57.06 | 52.42 | 58.64 | 58.04 | 60.86 |
| TiO2 | 0.59 | 1.11 | 1.08 | 0.81 | 0.55 | 0.89 | 0.82 | 0.89 | 0.79 | 0.90 | 0.78 | 0.77 | 0.64 |
| Al2O3 | 18.02 | 20.32 | 19.95 | 19.22 | 18.13 | 19.10 | 18.70 | 17.97 | 18.90 | 19.09 | 18.03 | 18.53 | 17.83 |
| Fe2O3 | 2.38 | 3.07 | 3.04 | 1.72 | 4.20 | 2.17 | 2.14 | 1.80 | 2.07 | 2.00 | 1.79 | 2.36 | 2.06 |
| FeO | 2.76 | 6.58 | 6.48 | 4.57 | 1.08 | 4.62 | 4.67 | 3.51 | 4.12 | 6.01 | 4.50 | 3.77 | 3.47 |
| MnO | 0.13 | 0.16 | 0.17 | 0.13 | 0.14 | 0.13 | 0.14 | 0.07 | 0.12 | 0.15 | 0.13 | 0.13 | 0.12 |
| MgO | 2.34 | 5.44 | 4.97 | 3.32 | 2.55 | 3.38 | 3.58 | 2.26 | 3.92 | 5.15 | 3.44 | 3.30 | 2.77 |
| CaO | 5.31 | 9.00 | 9.04 | 6.54 | 4.23 | 6.54 | 6.38 | 4.84 | 6.31 | 8.19 | 5.98 | 5.86 | 5.52 |
| Na2O | 4.83 | 3.41 | 3.66 | 4.26 | 4.31 | 4.50 | 4.45 | 5.07 | 4.35 | 4.03 | 4.37 | 4.19 | 4.16 |
| K2O | 1.90 | 0.88 | 0.91 | 1.58 | 2.11 | 1.51 | 1.57 | 1.87 | 1.55 | 1.38 | 1.67 | 1.73 | 1.91 |
| P2O5 | 0.34 | 0.34 | 0.33 | 0.35 | 0.39 | 0.32 | 0.35 | 0.45 | 0.33 | 0.37 | 0.35 | 0.32 | 0.38 |
| H2O | 0.07 | 0.38 | 0.35 | 0.62 | 0.97 | 0.45 | 0.29 | 0.35 | 0.48 | 0.33 | 0.32 | 1.03 | 0.30 |
| Tot | 100.01 | 99.98 | 100.00 | 99.99 | 100.03 | 100.00 | 100.02 | 100.00 | 100.00 | 100.02 | 100.00 | 100.03 | 100.02 |
| Q | 11.47 | 0.00 | 0.00 | 5.72 | 16.46 | 4.43 | 5.05 | 10.22 | 5.58 | 0.00 | 7.85 | 8.75 | 12.84 |
| Or | 11.23 | 5.20 | 5.38 | 9.34 | 12.47 | 8.92 | 9.28 | 11.05 | 9.16 | 8.15 | 9.87 | 10.22 | 11.29 |
| Ab | 40.87 | 28.85 | 30.97 | 36.04 | 36.47 | 38.08 | 37.65 | 42.90 | 36.81 | 34.10 | 36.98 | 35.45 | 35.20 |
| An | 21.88 | 37.54 | 35.32 | 28.66 | 18.44 | 27.46 | 26.41 | 20.75 | 27.47 | 29.92 | 24.65 | 26.64 | 24.34 |
| C | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Di | 1.81 | 3.98 | 6.01 | 1.23 | 0.00 | 2.36 | 2.41 | 0.26 | 1.36 | 6.76 | 2.23 | 0.27 | 0.46 |
| Hy | 7.33 | 8.84 | 7.73 | 13.54 | 6.35 | 12.73 | 13.45 | 9.12 | 13.88 | 8.80 | 13.21 | 12.03 | 10.51 |
| Ol | 0.00 | 7.84 | 7.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 6.49 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Mt | 3.45 | 4.45 | 4.41 | 2.49 | 2.34 | 3.15 | 3.10 | 2.61 | 3.00 | 2.90 | 2.60 | 3.42 | 2.99 |
| Ha | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 2.58 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Il | 1.12 | 2.11 | 2.05 | 1.54 | 1.04 | 1.69 | 1.56 | 1.69 | 1.50 | 1.71 | 1.48 | 1.46 | 1.22 |
| Ap | 0.79 | 0.79 | 0.76 | 0.81 | 0.90 | 0.74 | 0.81 | 1.04 | 0.76 | 0.86 | 0.81 | 0.74 | 0.88 |
| Aq | 0.07 | 0.38 | 0.35 | 0.62 | 0.97 | 0.45 | 0.29 | 0.35 | 0.48 | 0.33 | 0.32 | 1.03 | 0.30 |
| Tot | 100.01 | 99.98 | 100.00 | 99.99 | 100.03 | 100.00 | 100.02 | 100.00 | 100.00 | 100.02 | 100.00 | 100.03 | 100.02 |
| DI | 63.57 | 34.05 | 36.34 | 51.10 | 65.40 | 51.42 | 51.98 | 64.17 | 51.55 | 42.25 | 54.70 | 54.43 | 59.33 |

| MUESTRA | Rev-48 | Rev-49 | Rev-50 | Rev-51 | Rev-57 | Rev-58 | Rev-63 | Rev-70 | Rev-90 | Rev-92 | Rev-94 | Rev-100 |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| SiO2 | 58.11 | 60.06 | 60.55 | 58.65 | 57.52 | 54.75 | 53.29 | 55.15 | 55.04 | 57.35 | 57.64 | 50.10 |
| TiO2 | 0.69 | 0.67 | 0.61 | 0.66 | 0.79 | 0.85 | 1.01 | 0.85 | 0.80 | 0.89 | 0.81 | 1.09 |
| Al2O3 | 19.01 | 18.26 | 17.86 | 18.65 | 18.89 | 19.40 | 18.72 | 19.25 | 19.15 | 18.79 | 18.66 | 20.17 |
| Fe2O3 | 1.41 | 1.18 | 1.05 | 1.75 | 2.18 | 2.19 | 1.91 | 2.00 | 2.48 | 2.22 | 2.22 | 3.45 |
| FeO | 4.26 | 4.32 | 4.08 | 3.99 | 4.34 | 5.30 | 6.14 | 5.25 | 4.67 | 4.20 | 4.50 | 5.49 |
| MnO | 0.12 | 0.11 | 0.12 | 0.13 | 0.13 | 0.15 | 0.13 | 0.15 | 0.15 | 0.11 | 0.14 | 0.16 |
| MgO | 3.47 | 3.38 | 3.44 | 3.64 | 3.24 | 4.23 | 5.38 | 4.18 | 4.32 | 3.29 | 3.24 | 5.17 |
| CaO | 6.00 | 5.65 | 5.39 | 6.08 | 6.53 | 7.29 | 7.55 | 7.18 | 7.25 | 6.29 | 6.15 | 8.69 |
| Na2O | 4.36 | 3.90 | 4.28 | 4.18 | 4.07 | 3.82 | 3.72 | 3.94 | 3.92 | 4.67 | 4.38 | 3.93 |
| K2O | 1.85 | 1.85 | 1.88 | 1.70 | 1.57 | 1.42 | 1.36 | 1.48 | 1.67 | 1.54 | 1.63 | 1.01 |
| P2O5 | 0.37 | 0.29 | 0.27 | 0.30 | 0.41 | 0.29 | 0.45 | 0.28 | 0.32 | 0.37 | 0.36 | 0.40 |
| H2O | 0.35 | 0.31 | 0.47 | 0.30 | 0.32 | 0.31 | 0.33 | 0.29 | 0.23 | 0.27 | 0.29 | 0.35 |
| Tot | 100.00 | 99.98 | 100.00 | 100.03 | 99.99 | 100.00 | 99.99 | 100.00 | 100.00 | 99.99 | 100.02 | 100.01 |
| Q | 6.18 | 11.21 | 10.10 | 8.17 | 8.08 | 3.47 | 0.65 | 3.33 | 3.18 | 5.51 | 6.87 | 0.00 |
| Or | 10.93 | 10.93 | 11.11 | 10.05 | 9.28 | 8.39 | 8.04 | 8.75 | 9.87 | 9.10 | 9.63 | 5.97 |
| Ab | 36.89 | 33.00 | 36.21 | 35.37 | 34.44 | 32.32 | 31.48 | 33.34 | 33.17 | 39.51 | 37.06 | 33.25 |
| An | 26.84 | 26.14 | 23.97 | 27.10 | 28.64 | 31.59 | 30.36 | 30.47 | 29.72 | 25.76 | 26.44 | 34.41 |
| C | 0.00 | 0.26 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Di | 0.42 | 0.00 | 0.82 | 0.89 | 0.88 | 2.18 | 3.38 | 2.71 | 3.36 | 2.46 | 1.40 | 4.91 |
| Hy | 14.18 | 14.47 | 14.00 | 13.66 | 12.74 | 16.27 | 20.02 | 15.95 | 14.61 | 11.61 | 12.74 | 4.99 |
| Ol | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 8.13 |
| Mt | 2.04 | 1.71 | 1.52 | 2.54 | 3.16 | 3.18 | 2.77 | 2.90 | 3.60 | 3.22 | 3.22 | 5.00 |
| Il | 1.31 | 1.27 | 1.16 | 1.25 | 1.50 | 1.61 | 1.92 | 1.61 | 1.52 | 1.69 | 1.54 | 2.07 |
| Ap | 0.86 | 0.67 | 0.63 | 0.69 | 0.95 | 0.67 | 1.04 | 0.65 | 0.74 | 0.86 | 0.83 | 0.93 |
| Aq | 0.35 | 0.31 | 0.47 | 0.30 | 0.32 | 0.31 | 0.33 | 0.29 | 0.23 | 0.27 | 0.29 | 0.35 |
| Tot | 100.00 | 99.98 | 100.00 | 100.03 | 99.99 | 100.00 | 99.99 | 100.00 | 100.00 | 99.99 | 100.02 | 100.01 |
| DI | 54.00 | 55.14 | 57.43 | 53.58 | 51.80 | 44.18 | 40.16 | 45.42 | 46.21 | 54.12 | 53.56 | 39.22 |

CUADRO 7/1

ANALISIS QUIMICO DE ROCAS DEL COMPLEJO VOLCANICO EL REVENTADOR
PARTE 3: VOLCAN EL REVENTADOR CONO ACTUAL (VER)

| MUESTRA | Rev-12 | Rev-13 | Rev-14 | Rev-15 | Rev-16 | Rev-18 | Rev-19 | Rev-21 | Rev-73 | Rev-75 | Rev-77 | Rev-95 |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| SiO2 | 55.14 | 57.23 | 57.16 | 59.91 | 54.30 | 58.70 | 58.85 | 56.75 | 59.81 | 54.31 | 55.47 | 51.46 |
| TiO2 | 0.82 | 0.74 | 0.78 | 0.66 | 0.91 | 0.73 | 0.71 | 0.82 | 0.65 | 0.89 | 0.76 | 1.13 |
| Al2O3 | 19.29 | 19.18 | 18.87 | 18.36 | 19.04 | 18.54 | 18.56 | 18.43 | 18.26 | 18.99 | 18.95 | 19.48 |
| Fe2O3 | 1.92 | 2.27 | 2.40 | 1.60 | 2.62 | 1.77 | 2.01 | 2.13 | 1.84 | 2.82 | 2.36 | 2.49 |
| FeO | 5.00 | 3.82 | 4.11 | 3.88 | 4.87 | 4.21 | 4.10 | 4.81 | 3.90 | 4.77 | 3.94 | 5.62 |
| MnO | 0.14 | 0.12 | 0.13 | 0.12 | 0.15 | 0.12 | 0.14 | 0.13 | 0.13 | 0.14 | 0.13 | 0.15 |
| MgO | 3.92 | 3.66 | 3.45 | 3.15 | 4.74 | 3.39 | 3.00 | 3.95 | 3.01 | 4.57 | 5.21 | 5.24 |
| CaO | 7.06 | 6.37 | 6.28 | 5.70 | 7.33 | 6.09 | 5.83 | 6.65 | 5.77 | 7.34 | 6.49 | 8.37 |
| Na2O | 4.42 | 4.16 | 4.34 | 3.96 | 3.93 | 4.05 | 4.11 | 3.97 | 4.16 | 4.05 | 4.15 | 4.14 |
| K2O | 1.56 | 1.79 | 1.83 | 1.96 | 1.45 | 1.83 | 1.98 | 1.73 | 1.95 | 1.46 | 1.63 | 1.19 |
| P2O5 | 0.38 | 0.29 | 0.30 | 0.20 | 0.31 | 0.21 | 0.28 | 0.28 | 0.24 | 0.30 | 0.33 | 0.34 |
| H2O | 0.36 | 0.36 | 0.36 | 0.49 | 0.34 | 0.36 | 0.42 | 0.34 | 0.28 | 0.34 | 0.58 | 0.42 |
| Tot | 100.01 | 99.99 | 100.01 | 99.99 | 99.99 | 100.00 | 99.99 | 99.99 | 100.00 | 99.98 | 100.00 | 100.03 |
| Q | 1.54 | 6.30 | 5.66 | 10.88 | 2.40 | 8.62 | 9.10 | 5.80 | 10.15 | 2.20 | 2.79 | 0.00 |
| Or | 9.22 | 10.58 | 10.81 | 11.58 | 8.57 | 10.81 | 11.70 | 10.22 | 11.52 | 8.63 | 9.63 | 7.03 |
| Ab | 37.40 | 35.20 | 36.72 | 33.51 | 33.25 | 34.27 | 34.78 | 33.59 | 35.20 | 34.27 | 35.11 | 35.03 |
| An | 28.19 | 28.37 | 26.60 | 26.53 | 30.03 | 27.00 | 26.35 | 27.36 | 25.39 | 29.32 | 28.26 | 31.06 |
| Di | 3.56 | 1.08 | 2.10 | 0.36 | 3.48 | 1.50 | 0.61 | 3.10 | 1.36 | 4.14 | 1.42 | 6.68 |
| Hy | 14.53 | 12.74 | 12.09 | 12.61 | 15.67 | 13.00 | 12.13 | 14.29 | 11.64 | 14.60 | 16.57 | 4.78 |
| Ol | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 8.49 |
| Mt | 2.78 | 3.29 | 3.48 | 2.32 | 3.80 | 2.57 | 2.91 | 3.09 | 2.67 | 4.09 | 3.42 | 3.61 |
| Il | 1.56 | 1.41 | 1.48 | 1.25 | 1.73 | 1.39 | 1.35 | 1.56 | 1.23 | 1.69 | 1.44 | 2.15 |
| Ap | 0.88 | 0.67 | 0.69 | 0.46 | 0.72 | 0.49 | 0.65 | 0.65 | 0.56 | 0.69 | 0.76 | 0.79 |
| Aq | 0.36 | 0.36 | 0.36 | 0.49 | 0.34 | 0.36 | 0.42 | 0.34 | 0.28 | 0.34 | 0.58 | 0.42 |
| Tot | 100.01 | 99.99 | 100.01 | 99.99 | 99.99 | 100.00 | 99.99 | 99.99 | 100.00 | 99.98 | 100.00 | 100.03 |
| DI | 48.16 | 52.07 | 53.20 | 55.96 | 44.22 | 53.70 | 55.57 | 49.61 | 56.87 | 45.10 | 47.54 | 42.06 |

NOTA: Cálculos normativos: Norma CIPW
DI: Índice de diferenciación

En base a los criterios clasificativos de Irvine y Baragar (1972), los términos con SiO_2 mayor del 52% caen en el campo subalcalino, mientras que los términos basálticos y el gabro incluido en las lavas del VPR, presentan características químicas propias de una afinidad alcalina cayendo tanto en el campo alcalino, como sobre el límite con el campo subalcalino.

La afinidad petrogenética de los términos basálticos está también confirmada por su composición normativa, en cuanto se observa que en todas las muestras está presente el olivino y, a veces, la nefelina.

La comparación entre los diagramas $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ y $\text{alcali}/\text{SiO}_2$, que aparece en las figuras 17 y 18, indica claramente que la alcalinidad de los basaltos depende de los contenidos relativamente altos de Na_2O , mientras que el K_2O se mantiene por debajo del 1,2%.

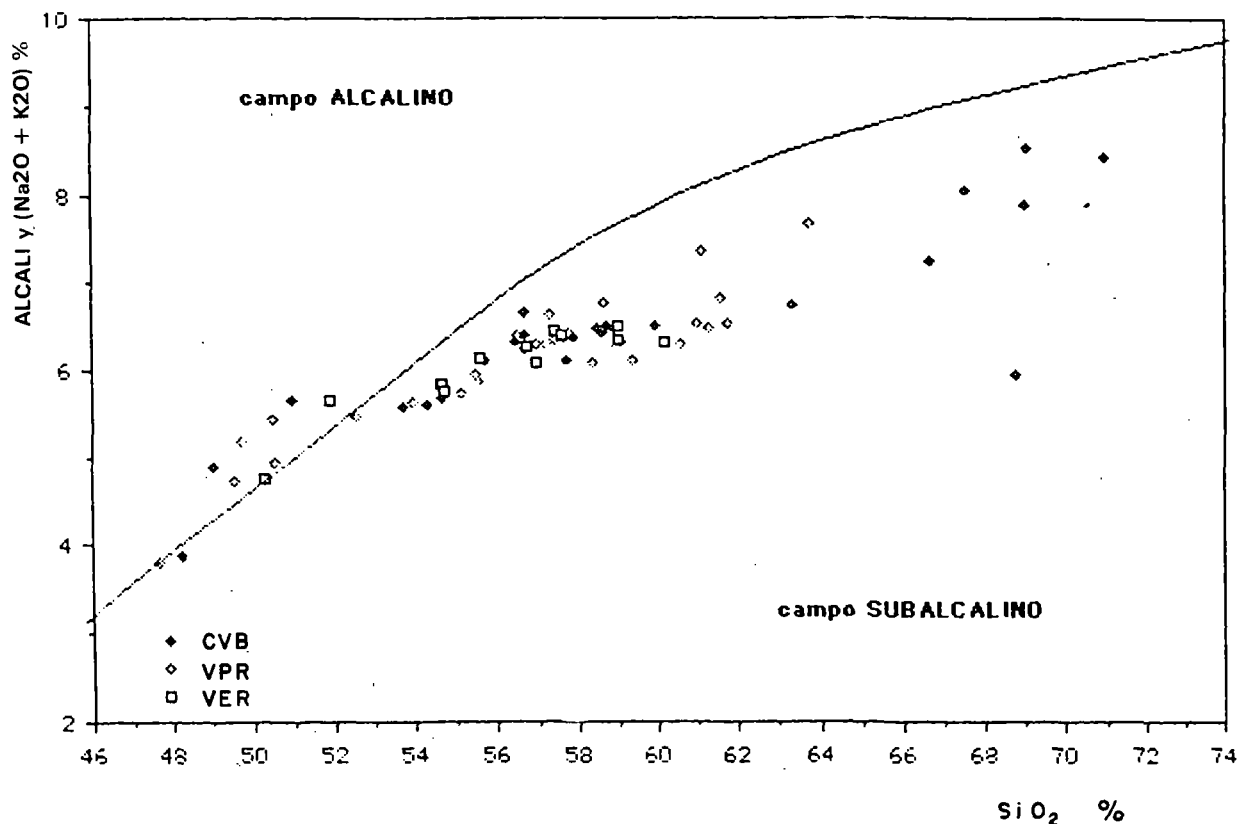


Figura 18.- Lavas del Complejo Volcánico El Reventador
Diagrama Alkali/SiO₂

La alcalinidad de estas rocas no refleja, entonces, ninguna tendencia hacia una afinidad shoshonítica.

En su conjunto, todas las muestras analizadas se disponen, dentro los diagramas de variación de los elementos mayores versus SiO_2 , según una tendencia regular con una muy limitada dispersión (Figura 19).

En particular se observa una buena correlación negativa del MgO , TiO_2 , CaO , Al_2O_3 , FeO y MnO con el SiO_2 . Una buena correlación positiva existe para el Na_2O , mientras el P_2O_5 presenta la máxima dispersión con una clara tendencia a su incremento a medida que varía el SiO_2 .

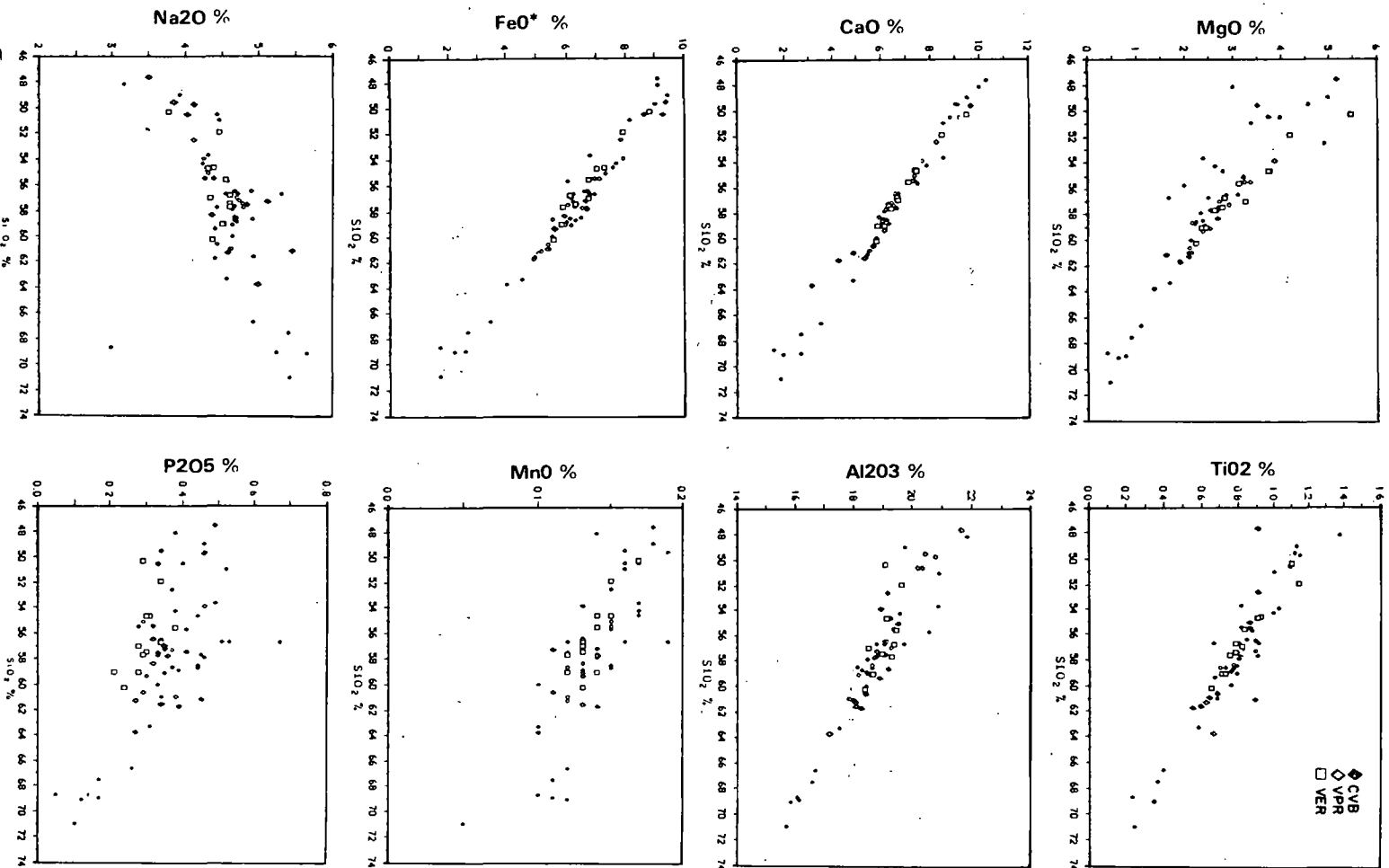


Figura 19 - Lavas del Complejo Volcánico El Reventador
Diagramas de variación de los elementos mayores
versus SiO_2

La dispersión del Na_2O podría ser, por lo menos en parte, atribuible a procesos secundarios post-eruptivos como se evidencia, seguramente, el caso de la piedra pómez del CVB que está afectada por alteración de su abundante vidrio mediante un proceso de lixiviación del NaO .

Una tendencia muy bien definida que se caracteriza por la ausencia de un enriquecimiento en hierro, se observa también en el diagrama Alkali/Hierro/Magnesio relativo a todas las lavas analizadas (Figura 20).

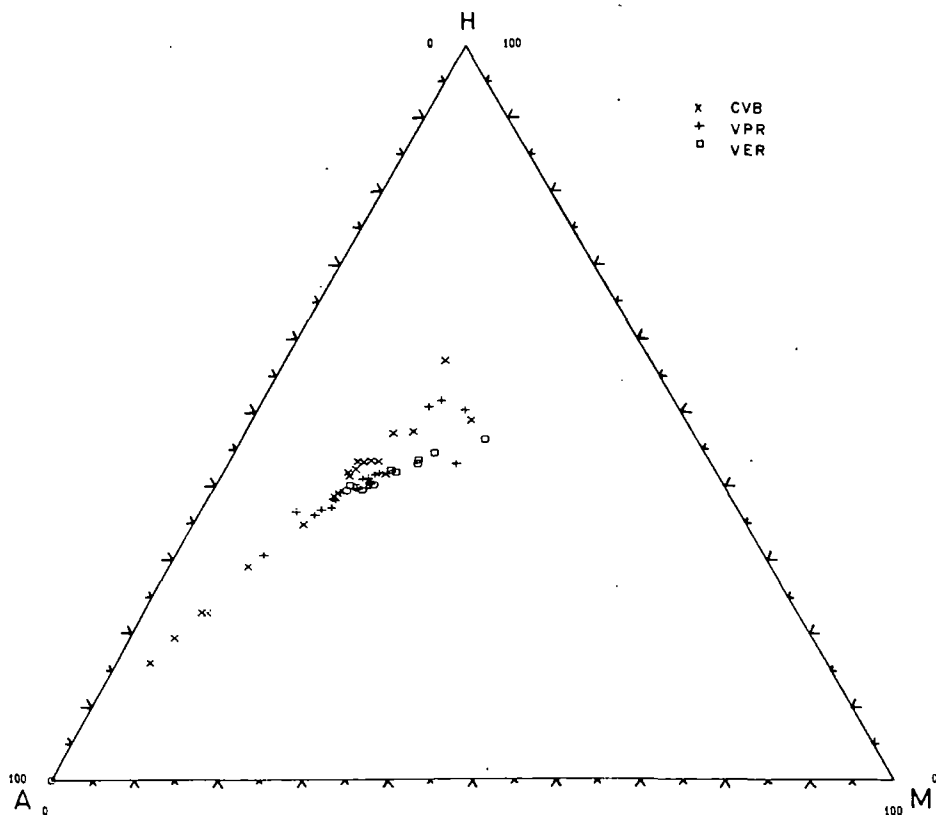


Figura 20.- Lavas del Complejo Volcánico El Reventador
Diagrama Alkali/Hierro/Magnesio (A/H/M)

Sin embargo, en este diagrama se nota que los productos menos evolucionados presentan la mayor variabilidad de la relación FeO/MgO respecto a los productos intermedios y ácidos. Además, se puede apreciar como las rocas del VER forman una tendencia prácticamente rectilínea, mientras que las muestras de las secuencias más antiguas presentan una ligera tendencia hacia un enriquecimiento inicial en Fe.

En general, las variaciones descritas son compatibles con un proceso de diferenciación por cristalización fraccionada que involucra las fases efectivamente observadas en los fenocristales. En particular, la marcada disminución de Al_2O_3 y de CaO y la poca variabilidad de Na_2O sugieren que la plagioclasa ha jugado un papel predominante. Todo esto indicaría, entonces, un fraccionamiento de tipo gábrico ocurrido en el interior de la corteza.

En lo que concierne a la comparación entre los productos pertenecientes a cada una de las unidades vulcanológicas, se observa que los diagramas de variación de los elementos mayores versus SiO_2 , indican una sustancial similitud de las características químicas y mineralógicas (Figuras 21, 22 y 23).

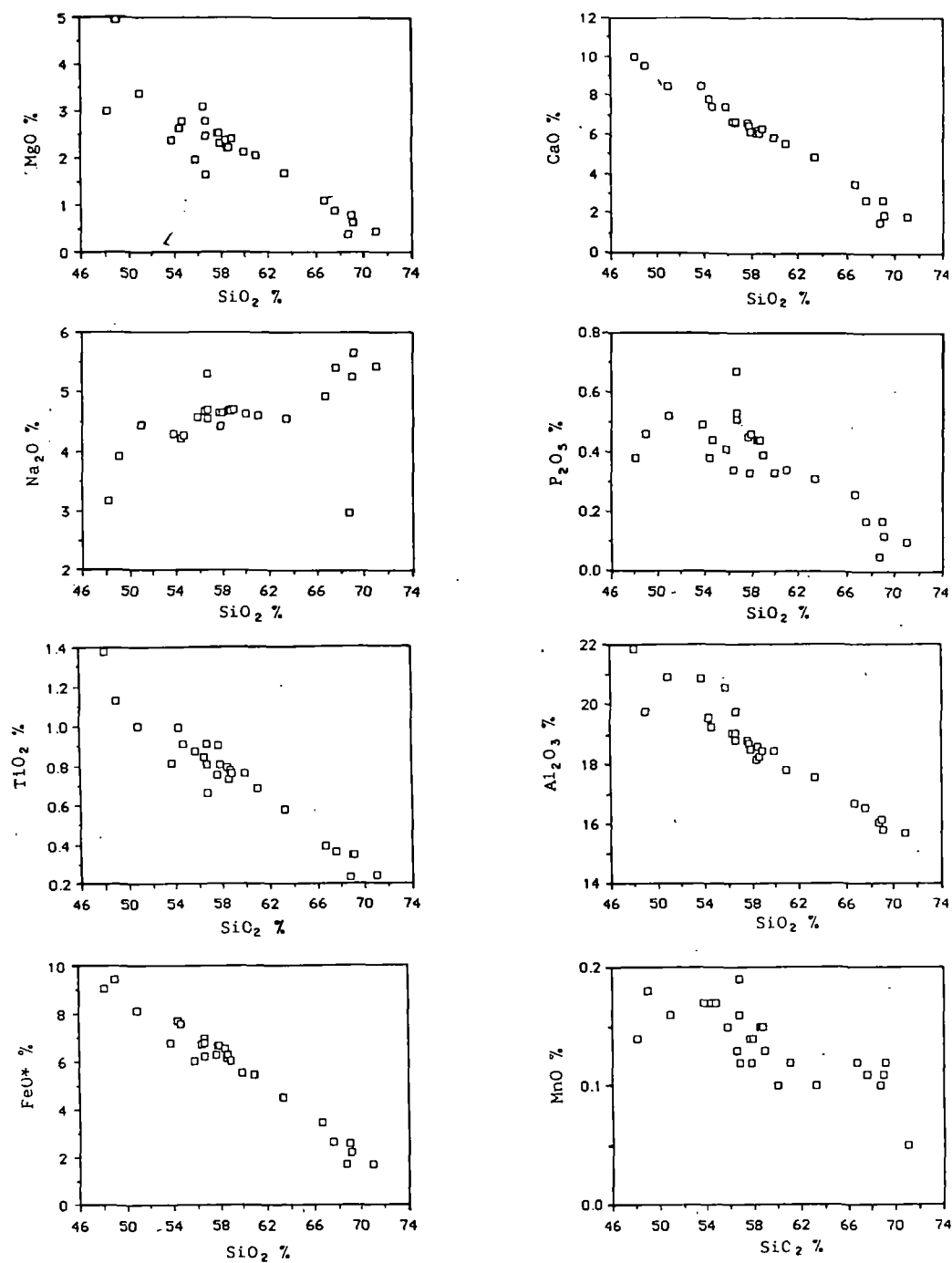


Figura 21.- Lavas del Complejo Volcánico Basal
Diagramas de variación de los elementos mayores versus SiO_2

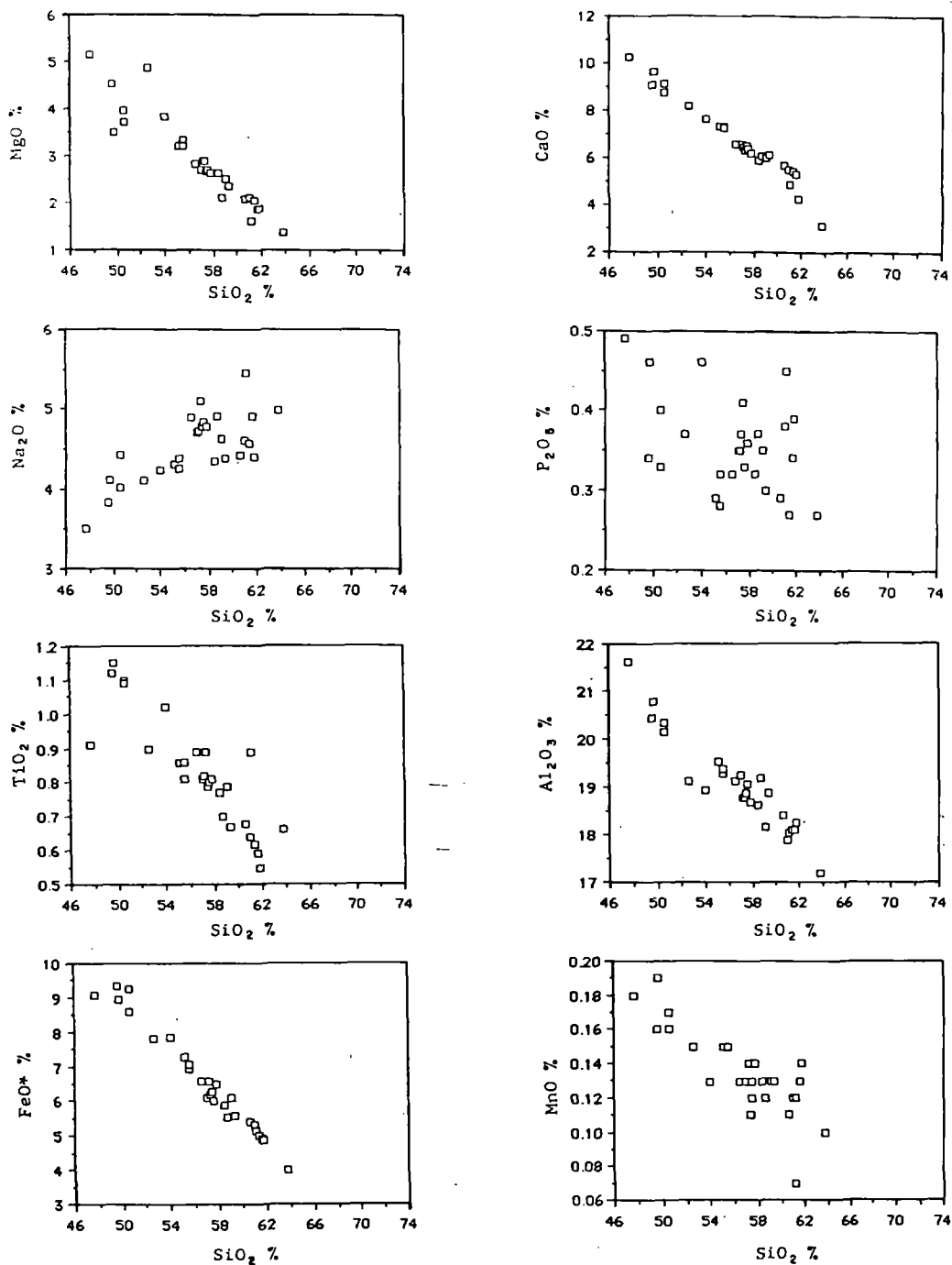


Figura 22.- Lavas del Volcán Paleoreventador
Diagramas de variación de los elementos mayores
versus SiO_2

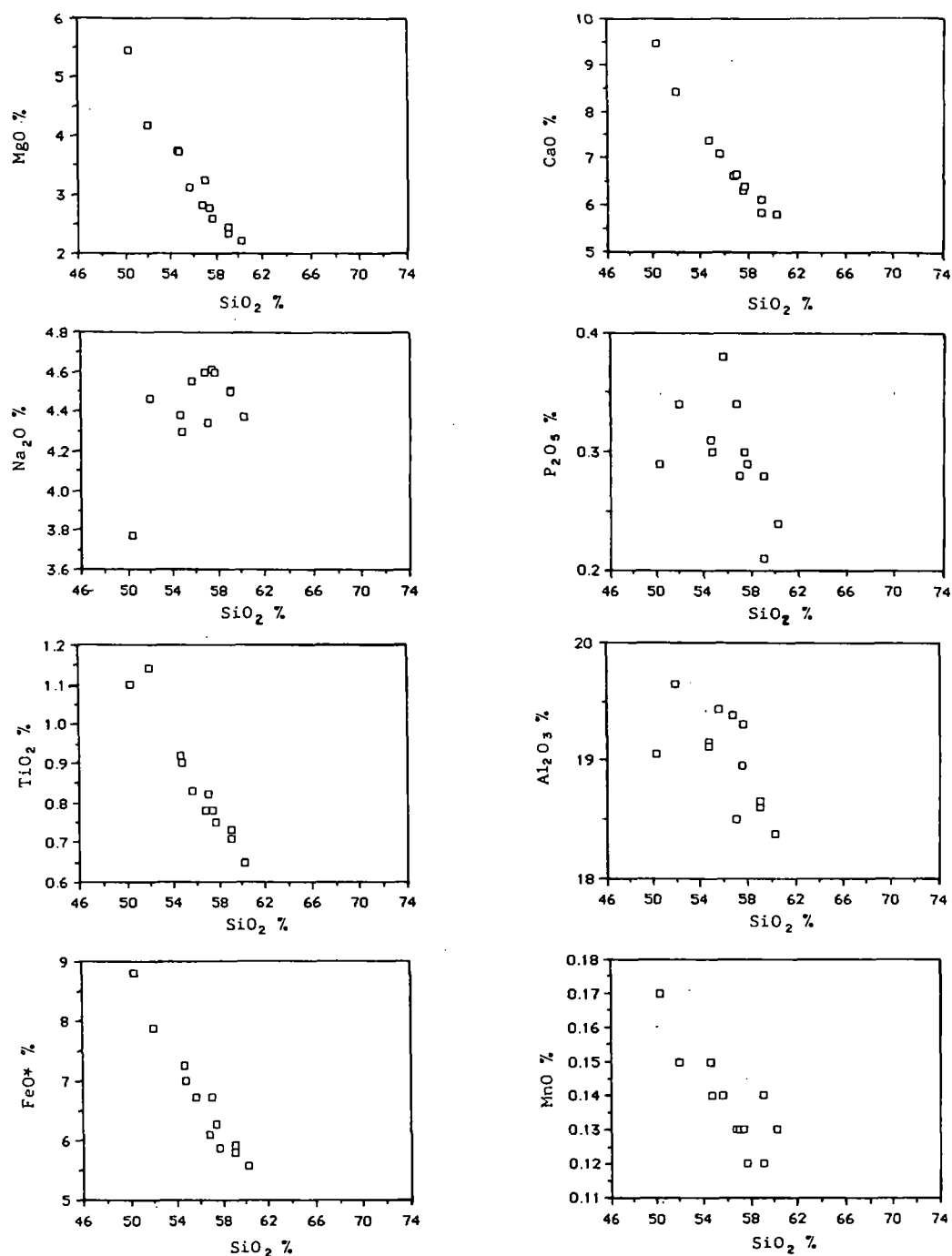


Figura 23.- Lavas del Volcán El Reventador
Diagramas de variación de los elementos mayores
versus SiO_2

Del examen de estos diagramas se puede concluir que las principales diferencias entre las lavas de las diferentes unidades vulcanológicas, son las siguientes:

- La máxima extensión del campo de variación hacia términos ácidos, se observa en los productos del CVB que llegan hasta las riolitas. La serie composicionalmente más reducida es la del VER con SiO_2 variable de 50,3 a 60,2%. Sin embargo, se debe subrayar que el último episodio explosivo del VPR, que no ha podido ser analizado debido a la falta de muestras convenientemente frescas, corresponde probablemente a una composición ácida muy evolucionada que estuvo seguida por productos más básicos correspondientes a la parte más profunda de la cámara.
- Los productos andesíticos del VER presentan un carácter ligeramente más potásico respecto a las andesitas más antiguas. Estas diferencias se desarrollan en un momento crítico del proceso de cristalización, caracterizado por la aparición casi simultánea de ortopiroxeno y anfíbol ($\text{SiO}_2 = 55\%$). El anfíbol se encuentra más difundido en las series del CVB y del VPR que en la serie del VER, sugiriendo probablemente una mayor participación de este mineral en el fraccionamiento de las series antiguas que explicaría la variación de la pendiente de la curva de correlación $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ (Figura 17).

7.2 Condiciones de cristalizaciones de los magmas

— Temperatura

Como se ha mencionado anteriormente, la secuencia de cristalización de las fases mineralógicas es diferente para cada tipo de roca.

En las rocas de tipo basáltico, el olivino es el primero en aparecer sobre el líquido magmático; por lo tanto en estas rocas, se ha evaluado la temperatura inicial de cristalización en base al equilibrio olivino-líquido.

En el Cuadro 7/2 se presentan los valores obtenidos a partir de las ecuaciones de Roeder (1974) y de Leeman y Scheidegger (1977). Esta última versión del geotermómetro asigna valores de temperatura generalmente más altos y, probablemente, más confiables. Los valores indicados entre paréntesis resultan demasiado elevados; esto depende de la dificultad en determinar con precisión el contenido de Mn.

CUADRO 7/2

| TEMPERATURAS DE CRISTALIZACION ESTIMADAS POR MEDIO DEL GEOTERMOMETRO OLIVINO-LIQUIDO MAGMÁTICO (en °C) | | | | | |
|---|----|-------|-------|---------|-------------|
| Muestra | | t(Mg) | t(Fe) | t(Mn) | t(promedio) |
| Basalto (VER) | 1) | 1.038 | 1.014 | 1.029 | 1.027 |
| | 2) | 1.110 | 1.093 | 1.122 | 1.108 |
| Basalto (VPR) | 1) | 1.035 | 1.047 | (1.138) | 1.041 |
| | 2) | 1.108 | 1.128 | (1.212) | 1.118 |

1) Roeder, 1974
2) Leeman y Scheidegger, 1977

En las rocas de tipo andesítico más evolucionadas, la primera fase que aparece sobre el líquido magmático es, probablemente, la plagioclasa; sin embargo, la aparición de todas las fases se verifica en intervalos de temperatura generalmente muy pequeños (pocas decenas de grados), Green (1982).

En estas rocas la presencia del ortopiroxeno y del clinopiroxeno permite obtener una estimación de la temperatura de equilibrio de dichas fases mineralógicas. Este valor de la temperatura fue utilizado como una variable independiente para la descripción del equilibrio plagio-

clasa-líquido magmático que, por lo tanto, resulta dependiente sólo de la presión parcial del agua.

El cálculo de las temperaturas de equilibrio entre los piroxenos (Cuadro 7/3) ha sido realizado sobre parejas de núcleos asumiendo la hipótesis que cristalizaron contemporáneamente y utilizando los procedimientos de Wells (1977) y Lindsley (1983). Las temperaturas calculadas mediante los dos métodos presentan una buena concordancia.

| CUADRO 7/3 | | | | | | |
|--|-----------------------|-------|-------|-------|------------|-------------|
| — TEMPERATURAS DE CRISTALIZACION ESTIMADAS POR MEDIO DEL GEOTERMOMETRO A DOS PIROXENOS (en °C) | | | | | | |
| — PRESIONES DE AGUA Y TOTAL | | | | | | |
| Muestra N° | Nombre | t(LS) | t(W) | t(L) | pH2O (bar) | Ptot. (bar) |
| Rev 9 | Andesita básica (CVB) | | 997 | 1.010 | 1.180 | |
| Rev 86 | Andesita ácida (CVB) | | 980 | 990 | 1.150 | |
| Rev 14 | Andesita (VER) | | 1.032 | 1.050 | 920 | 7.000 |
| Rev 95 | Basalto (VER) | 1.108 | | | | |
| Rev 28 | Andesita ácida (VPR) | | 925 | 910 | 1.000 | |
| AO2 | Basalto (VPR) | 1.118 | | | | 7.260 |
| - t(LS) (t según Leeman y Schidegger, 1977) | | | | | | |
| - t(W) (t según Wells, 1977) | | | | | | |
| - t(L) (t según Lindsley, 1983; t computada a 5.000 bar) | | | | | | |
| - pH2O (p según Kudo y Weill, 1970) | | | | | | |

— Presión de agua y presión total

El cálculo de la presión de agua (pH₂O) se efectuó partiendo de la relación de equilibrio plagioclasa-líquido magmático. En efecto, los datos experimentales permiten evaluar la composición de la plagioclasa en función de la composición del líquido en equilibrio, de la temperatura y de la presión de agua. (Kudo y Weill, 1970)

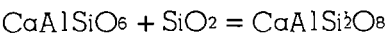
En las rocas andesíticas se ha asumido que la composición de los núcleos básicos de plagioclasa corresponde a la composición de la primera fase sobre el líquido y que, por lo tanto, éstos estarían en equilibrio sobre el líquido cuya composición es, aproximadamente, la misma de la roca total.

Además, se asumió la temperatura de equilibrio de los piroxenos, obtenida con el procedimiento de Wells, como la del inicio de la cristalización de la plagioclasa.

Estos datos procesados con la ecuación de Kudo y Weill permitieron calcular gráficamente los valores de la presión de agua correspondiente al equilibrio.

Los datos obtenidos se presentan en el Cuadro 7/3. Como se puede observar, los valores de presión de agua resultan muy similares en todas las rocas analizadas ubicándose alrededor de 1.000 bar.

El cálculo de la presión total (P_{tot}) se efectuó partiendo de la siguiente reacción:



cuya constante de equilibrio, que depende tanto de la presión como de la temperatura, se obtiene de la ecuación de Arculus y Wills (1980)

La actividad de las diferentes fases en equilibrio fueron determinadas en base a los procedimientos de Herzberg (1978) y en base a un modelo general de solución regular para los líquidos silicáticos propuesto por Ghiorso et al, (1983). Seguidamente, mediante un apropiado programa de cálculo, se determinaron los valores de actividad a diferentes temperaturas para

los líquidos seleccionados. Los valores obtenidos y las correspondientes temperaturas fueron posteriormente introducidos en la ecuación de Arculus y Wills que fue resuelta para varios niveles de temperatura y presión.

Los valores de presión y temperatura obtenidos, representan la condición de equilibrio de la reacción indicada para las composiciones consideradas (núcleos de los fenocristales).

A partir de estos valores, si se dispone de estimaciones independientes de la temperatura de cristalización, derivadas de los geotermómetros anteriormente descritos, es posible determinar los valores de la presión de cristalización de los núcleos de piroxeno y plagioclasa.

El método expuesto ha sido aplicado sólo al basalto del VPR y a la andesita del VER. Esta selección se efectuó para evitar que los fenómenos de mezcla, que deben ser invocados para explicar la génesis de algunas secuencias de magmas de El Reventador, introduzcan en la cristalización otros elementos de disequilibrio que no se pueden tomar en cuenta en la reacción arriba considerada.

Los resultados obtenidos (Cuadro 7/3), indican valores concordantes y una presión de alrededor de 7.000 bar al inicio de la cristalización, tanto para el basalto como para la andesita. Los mismos resultados están presentados gráficamente en la Figura 24.

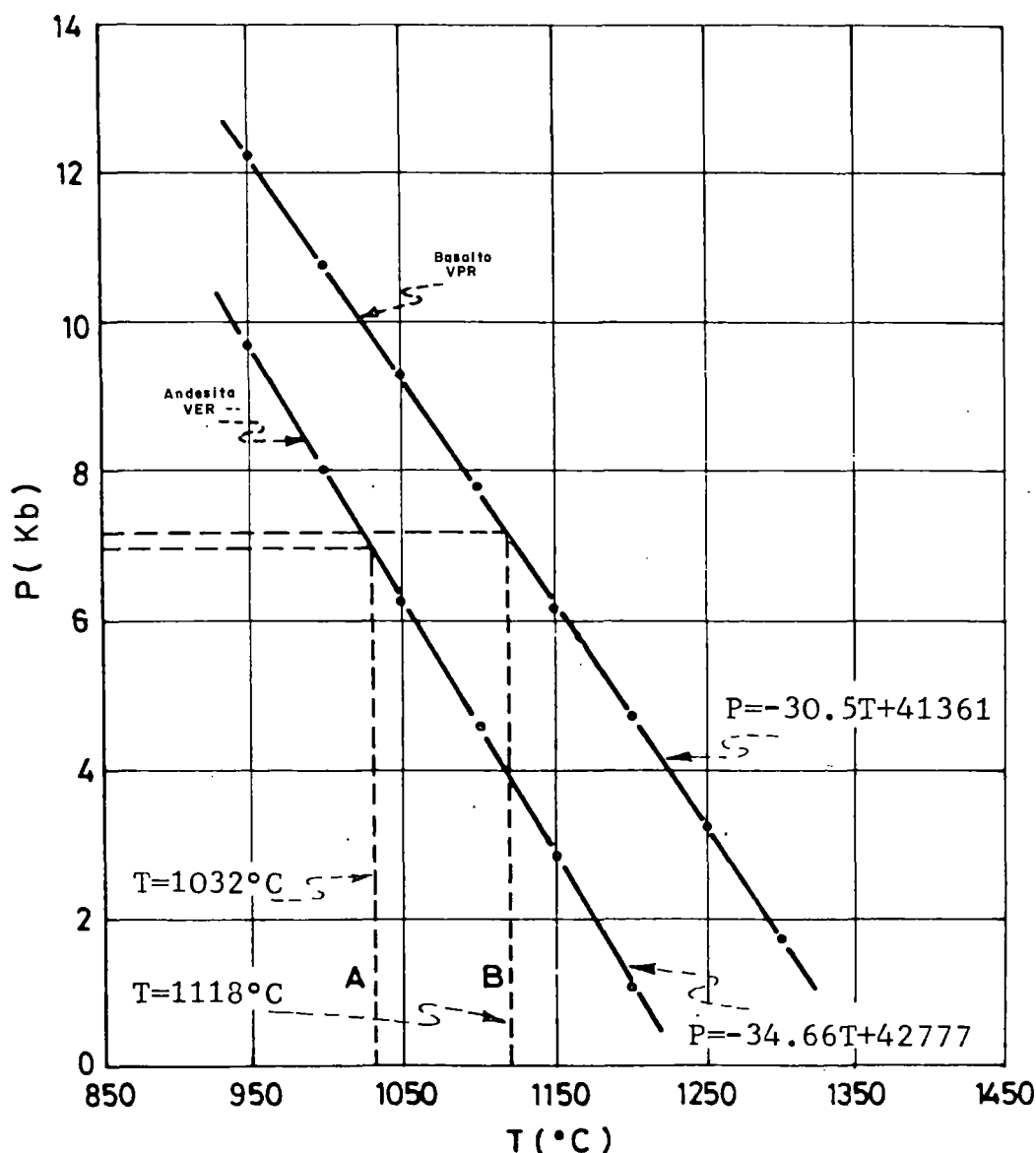


Figura 24.- Basaltos VPR y andesitas VER
Diagrama presión-temperatura para la reacción
 $\text{CaAl}_2\text{SiO}_6 + \text{SiO}_2 = \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$

Una confirmación cualitativa de las estimaciones barométricas efectuadas, se obtiene proyectando todas las muestras analizadas en los diagramas de fase pseudoternarios propuestos por Baker y Eggler (1983), Figuras 25 y 26.

En el diagrama $Ol/Di/(Qz+Or)$, los líquidos ubicados sobre la curva cotética se encuentran saturados en plagioclasa y magnetita, mientras que en el diagrama $Pl/Di/(Qz+Or)$ están saturados en olivino y magnetita.

En conclusión, las rocas de El Reventador delinean una tendencia característica de cristalización fraccionada y sugieren condiciones de presión total relativamente alta, próxima a los 8.000 bar.

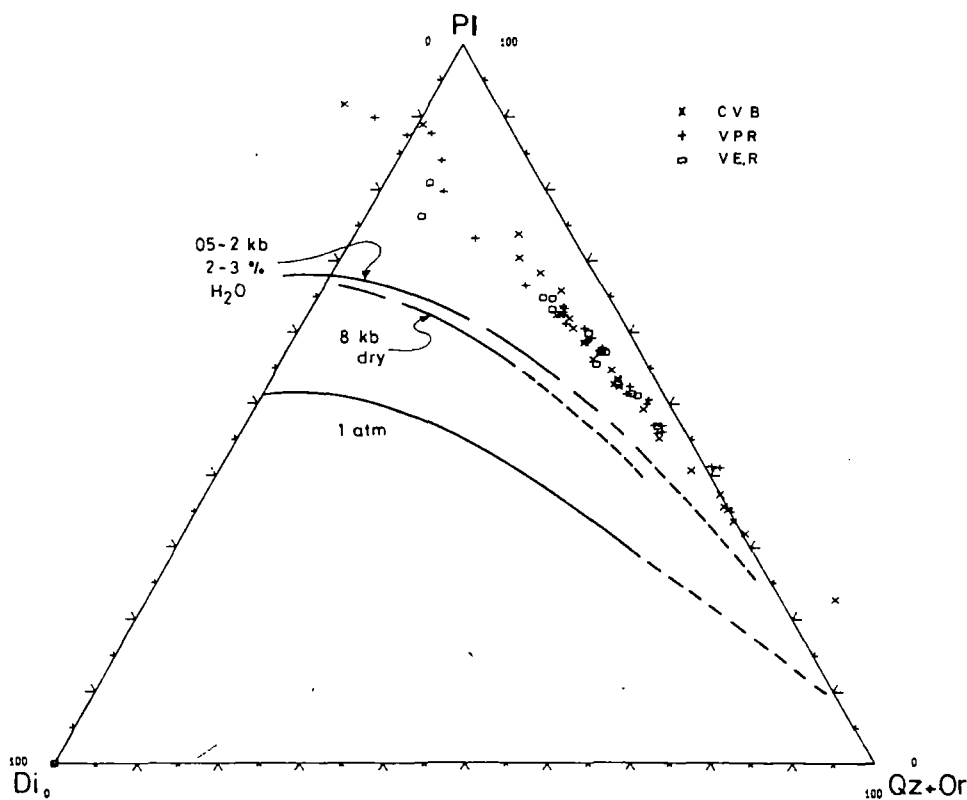


Figura 25.- Lavas del Complejo Volcánico El Reventador
Diagrama pseudoternario diopsido/plagioclasa/
cuarzo + ortoclasa
Curvas cotéticas saturadas en magnetita y olivino

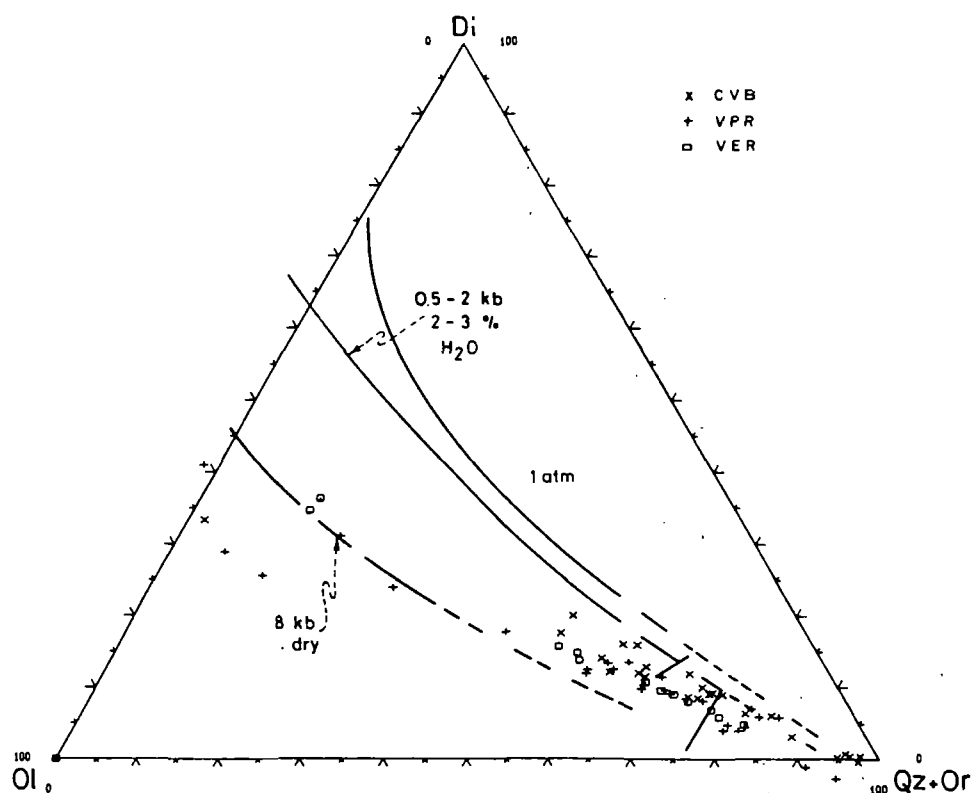


Figura 26.- Lavas del Complejo Volcánico El Reventador
Diagrama pseudoternario diopsido/olivino/cuarzo + ortoclasa
Curvas cotécticas saturadas en magnetita y plagioclasa

— Contenido de agua

La estimación del valor de la presión de agua, efectuada mediante la relación de Kudo y Weill (1970), permite calcular el contenido de agua en el magma utilizando la metodología propuesta por Nicholls (1980).

A partir de un modelo termodinámico de una solución regular de agua en los fundidos silicáticos, se calcula el valor de la fugacidad del agua, considerando su coeficiente de actividad como una función exclusiva de la composición del fundido anhidro.

El cálculo del porcentaje de agua se efectuó introduciendo, en un algoritmo apropiado, los valores de la fugacidad del agua, la presión total y la temperatura. Para el cálculo se utilizó una presión total de referencia igual a 7.000 bar.

Los resultados obtenidos están indicados en el Cuadro 7/4.

En las andesitas del CVB y del VPR, se encontraron contenidos de agua (2, 2-2,5%) similares entre sí y relativamente elevados, mientras que en las andesitas del VER, correspondientes a la última erupción del año 1976, el contenido de agua resulta sensiblemente inferior (1,4%).

CUADRO 7/4

| CONTENIDO DE AGUA EN EL MAGMA | | | | | |
|-------------------------------|-------|-------|---------------|---------------|------------|
| Muestra | | t(°C) | Ptot (bar) | pH2O (bar) | H2O (%) |
| Andesita básica | (CVB) | 1.000 | 7.000 | 1.150 | 2,2 |
| Andesita ácida | (CVB) | 1.000 | 7.000 | 1.150 | 2,2 |
| Andesita ácida | (VPR) | 950 | 7.000 | 1.000 | 2,5 |
| Andesita | (VER) | 1.032 | 7.000 | 900 | 1,4 |

— Viscosidad y densidad

A partir de la composición química y del contenido en cristales de los productos volcánicos, es posible estimar el valor de la viscosidad del magma que los ha generado en función de la temperatura.

Este cálculo se efectúa siguiendo el algoritmo propuesto por McBirney y Murase (1984), que toma en consideración la temperatura, la composición de la roca y de la masa fundamental, el contenido en fenocristales y su diámetro promedio.

La viscosidad y la densidad han sido calculadas para dos lavas andesíticas del VER y para dos lavas basálticas del VER y del VPR.

Los resultados obtenidos están indicados en el Cuadro 7/5.

Los valores de viscosidad calculados para las rocas consideradas como líquidos son muy parecidos (log = 4,3 a 4,8). Introduciendo las correcciones por la presencia de las fases cristalinas se produce una mayor variación de los resultados debido, sobre todo, al diferente contenido en fenocristales que influye también sobre la composición del líquido residual (log = 6,5 a 9,2).

CUADRO 7/5

| VISCOSIDAD Y DENSIDAD DEL MAGMA | | | | | | | | |
|---------------------------------|----------|-------|-------|-------|------------|---------------------|-----------------|-------------------|
| Muestra Nº | Nombre | | SiO2 | t | Viscosidad | | Densidad* | |
| | | | | | | | | |
| | | | (%) | (°C) | líquido | líquido + minerales | líquido anhidro | líquido hidratado |
| | | | | | (log) | | (Kg/m3) | |
| Rev 14 | Andesita | (VER) | 57,43 | 1.032 | 4,8 | 8,3 | 2,51 | 2,46 |
| Rev 73 | Andesita | | | | | | | |
| | ácida | (VER) | 60,19 | 1.050 | 4,8 | 9,2 | 2,49 | 2,48 |
| Rev 95 | Basalto | (VER) | 51,90 | 1.108 | 4,4 | 8,8 | 2,58 | 2,56 |
| AO2 | Basalto | (VPR) | 49,57 | 1.118 | 4,3 | 6,5 | 2,62 | 2,60 |

*: Densidad del líquido anhidro e hidratado a 7.000 bar.

La variación de la viscosidad respecto a la temperatura ha sido calculada para la lava andesítica emitida en la erupción del año 1976. Los resultados obtenidos están indicados gráficamente en la Figura 27. La curva de variación de viscosidad se refiere tanto al magma considerado totalmente líquido, como al magma que presenta cristales en suspensión.

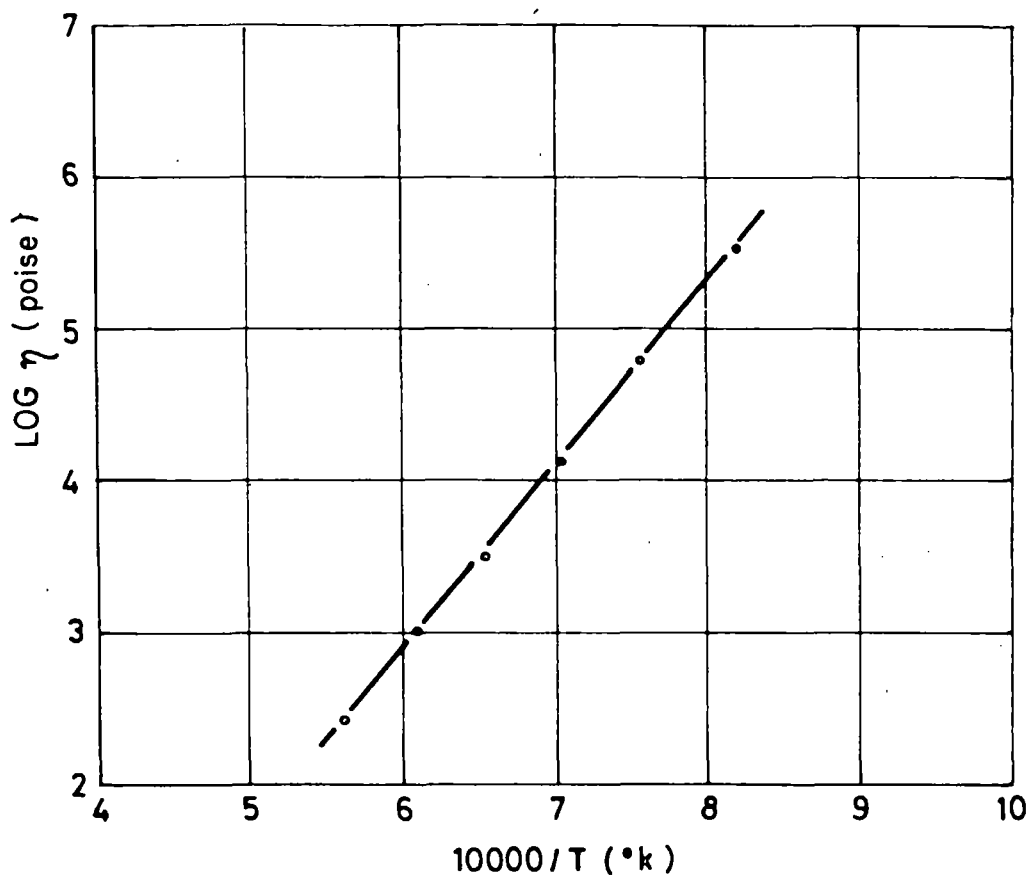


Figura 27.- Lava del Volcán El Reventador
Variación de la viscosidad en función de la temperatura

Los valores de densidad han sido calculados siguiendo las ecuaciones propuestas por Bottinga et al, (1982), que permiten obtener la densidad de los líquidos aluminosilicáticos en función de su temperatura y composición.

La influencia del agua ha sido evaluada adoptando un simple modelo de solución regular para líquidos aluminosilicáticos hidratados que aproxima el comportamiento de estos sistemas hasta contenidos en agua menores de 10% (Burnham y Davis, 1969).

En las lavas andesíticas y andesíticas ácidas del VER, se observa una inversión de los valores entre líquidos anhidros e hidratados. Esto debe ser considerado como una consecuencia del mayor contenido en agua, calculado para las lavas andesíticas (1,4%), respecto a las lavas andesíticas ácidas para las cuales se utilizó el valor obtenido del análisis químico (0,3%).

8. MODELIZACION DEL SISTEMA ERUPTIVO

DEL CONO ACTUAL

Como se ha indicado anteriormente, los productos del Volcán El Reventador (VER) presentan un espectro composicional relativamente estrecho, comprendido entre basaltos ($\text{SiO}_2 = 51,9\%$) y andesitas ($\text{SiO}_2 = 60,2\%$).

En base a los datos obtenidos en el curso de los levantamientos geovulcanológicos de campo, se pudo reconstruir la sucesión temporal de los eventos eruptivos. La secuencia de emisión de las coladas lávicas (ver Mapa Geológico Volcán El Reventador) y una estimación de los volúmenes relativos se presenta en el Cuadro 8/1.

CUADRO 8/1

| SECUENCIA DE EMISION Y VOLUMEN DE LAS COLADAS LAVICAS DEL VOLCAN EL REVENTADOR (VER) | | | | |
|---|---------|----------------------|--------------------|--|
| Denominación de la colada | Muestra | Edad de la colada | Litología | Volumen (x 10 ⁶ m ³) |
| $\alpha 1$ | Rev-73 | reciente | Andesita ácida | 8 |
| $\alpha 2$ | | reciente | (sin muestra) | 30 |
| $\alpha 3$ | Rev-18 | reciente | Andesita | 22 |
| $\alpha 4$ | Rev-19 | reciente | Andesita | 18 |
| $\alpha 5$ | Rev-21 | reciente | Andesita | 14 |
| $\alpha 6$ | Rev-16 | reciente | Andesita basáltica | 37 |
| $\alpha 7$ | Rev-95 | reciente | Basalto | 20 |
| $\alpha 8$ | Rev-75 | reciente | Andesita basáltica | 56 |
| $\alpha 9$ | Rev-12 | años 1972-74 | Andesita basáltica | 13 |
| $\alpha 10$ | Rev-14 | año 1976 | Andesita | 18 |

La variación química en función de la edad relativa de las lavas emitidas muestra una tendencia característica. El grado de evolución disminuye sistemática y paulatinamente desde los productos más antiguos (lava $\alpha 1$, andesita ácida), hasta la lava $\alpha 7$ (basalto), para volver

a aumentar con regularidad hasta los productos más recientes que alcanzan grados de evolución comparables a los que presentan las lavas iniciales (Figura 28).

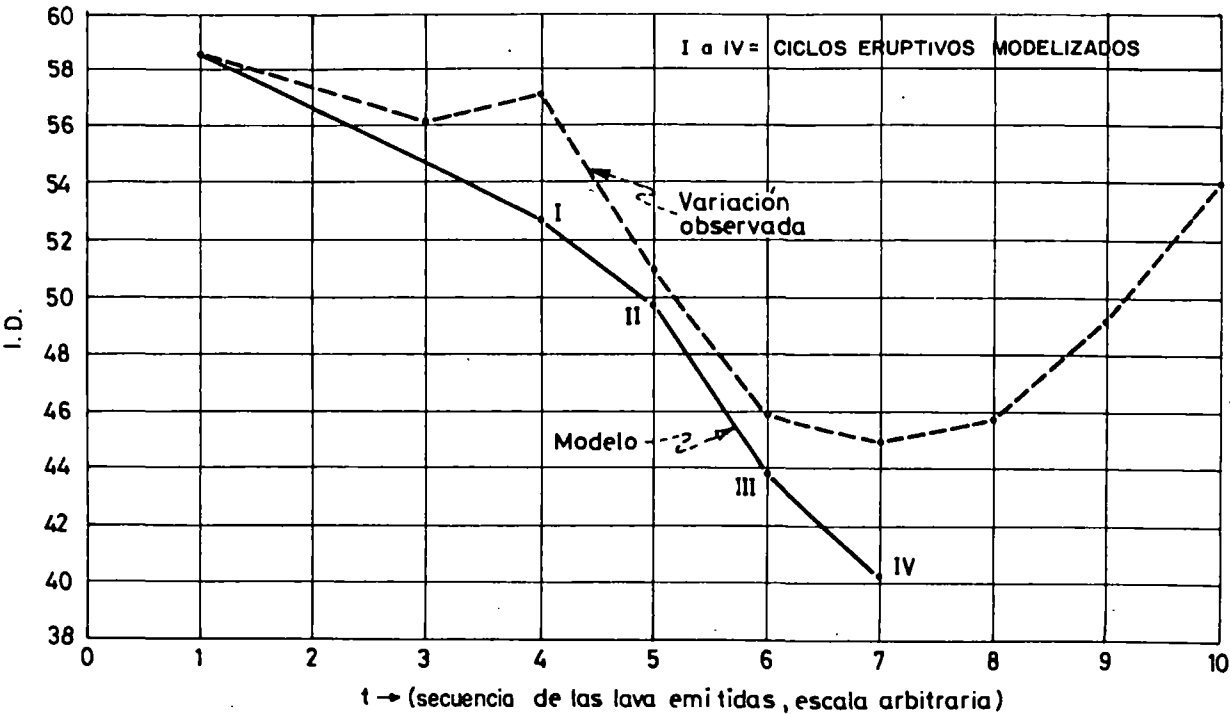


Figura 28.- Lavas del Volcán El Reventador (VER)
Variación del índice de diferenciación (I.D.)

El grado de evolución a partir de la colada α7 (basalto) hasta la colada α10 (andesita) corresponde a una tendencia controlada por un proceso de cristalización fraccionada de la plagioclasa y de los minerales máficos, tal como lo sugieren los diagramas de variación de los elementos mayores (Figuras 29 y 30).

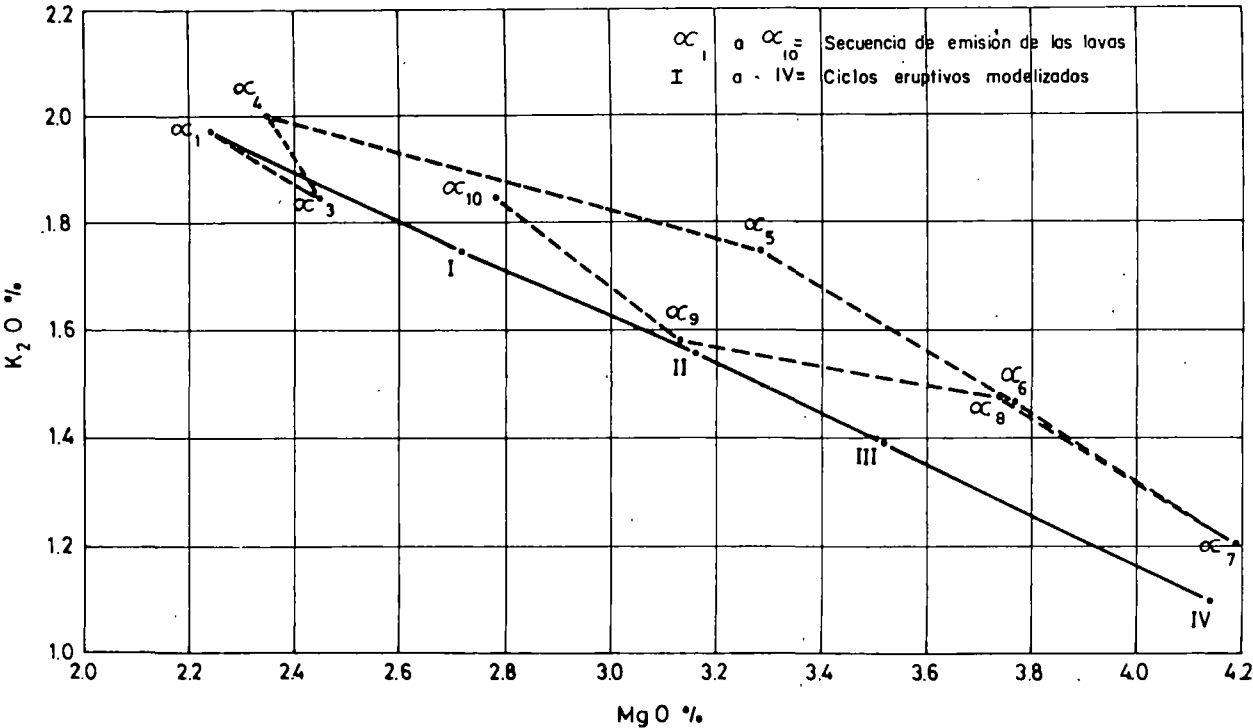


Figura 29.- Lavas del Volcán El Reventador (VER)
Diagrama K2O/MgO

A-02 = Basalto VPR
 REV-95 = Basalto VER, colada $\alpha 7$
 REV-75 = Andesita basáltica VER, colada $\alpha 8$
 REV-12 = Andesita basáltica VER, colada $\alpha 9$
 REV-14 = Andesita VER, colada $\alpha 10$
 REV-73 = Andesita ácida, colada $\alpha 1$

CUADRO 8/2

| MODELO DE CRISTALIZACION FRACCIONADA PARA LOS PRODUCTOS MAS RECIENTES DEL VOLCAN EL REVENTADOR (VER) | | | | | | | | | |
|---|-------------|------|------|------|------|------|------|------|----------------|
| Colada | | OI | PI | Cpx | Opx | Mt | Hb | %Sol | r ² |
| desde | hasta | | | | | | | | |
| Basalto (VPR) | $\alpha 7$ | 13,7 | 70,7 | 2,9 | | 12,6 | | 23,5 | 0,01 |
| $\alpha 7$ | $\alpha 8$ | 11,5 | 68,2 | 11,4 | | 9,0 | | 22,2 | 0,96 |
| $\alpha 8$ | $\alpha 9$ | 22,2 | 44,2 | 24,5 | | 9,1 | | 6,8 | 0,01 |
| | | 8,9 | 23,8 | | | 4,8 | 62,5 | 7,0 | 0,02 |
| $\alpha 9$ | $\alpha 10$ | | 71,0 | 8,7 | 11,8 | 8,5 | | 18,1 | 0,14 |
| | | | 59,1 | | | 5,7 | 35,2 | 16,5 | 0,07 |
| $\alpha 10$ | $\alpha 1$ | | 72,3 | | 17,9 | 9,7 | | 18,6 | 0,56 |
| | | | 57,9 | | | 7,9 | 34,2 | 16,7 | 0,52 |
| OI = olivino; PI = plagioclasa; Cpx = clinopiroxeno; Opx = ortopiroxeno; Mt = magnetita; Hb = hornblenda | | | | | | | | | |

La confiabilidad del ajuste es óptima, como se evidencia por los valores muy bajos de la suma de los cuadrados de las diferencias entre las composiciones observadas y calculadas (r^2).

El modelo de fraccionamiento impone la presencia, entre los minerales máficos, del olivino, en los primeros estadios; del clinopiroxeno y del ortopiroxeno en los estadios intermedios y, finalmente, del ortopiroxeno en los últimos. Esta secuencia de fases concuerda perfectamente con la presencia observada de los fenocristales.

Los resultados del cálculo ponen en evidencia que el modelo no puede excluir la presencia del anfíbol únicamente en la transición de los términos más evolucionados. De cualquier forma, la presencia de la hornblenda parece poco probable porque excluiría del fraccionamiento a los piroxenos, que siempre constituyen las fases máficas mucho más abundantes.

— Sistema abierto. Evolución por realimentación y mezcla

La secuencia composicional inversa que varía entre los términos más y menos evolucionados y que se observa en el primer período de actividad del volcán, podría describirse a través de un modelo de cámara magmática afectada por un proceso de cristalización fraccionada a la que, periódicamente, se adiciona un líquido más básico.

Las variaciones composicionales del magma en la cámara se pueden determinar mediante un programa de simulación desarrollado por Conrad (1987), que se basa sobre las ecuaciones propuestas por De Paolo (1981). Este programa permite describir la evolución composicional del magma y de las fases en equilibrio durante una serie de ciclos de fraccionamiento, mezcla con magma primitivo y erupción (Figura 32).

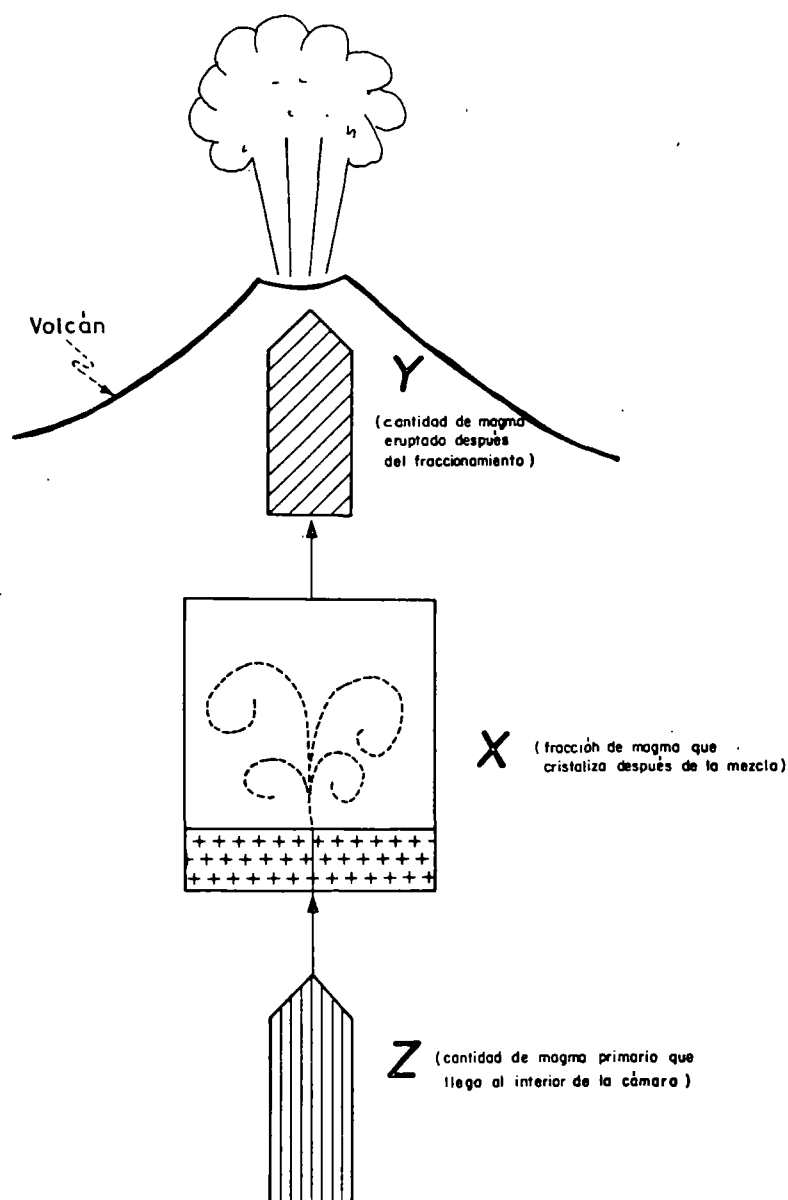


Figura 32.- Volcán El Reventador (VER)
Esquema del modelo de alimentación

Los "input" del programa son:

1. La composición del magma presente en la cámara al inicio del ciclo.
2. La composición del magma agregado al sistema.
3. La composición inicial de las fases involucradas en el proceso de cristalización fraccionada.
4. El porcentaje en peso de las fases removidas pertenecientes al sólido fraccionado.
5. El porcentaje en peso del sólido fraccionado respecto al magma total contenido en la cámara.
6. Los coeficientes de distribución Fe/Mg entre Opx, Cpx, Ol y líquido magmático.
7. El porcentaje en peso del magma primario agregado (Z), en cada ciclo, al magma que se encontraba presente en la cámara.
8. El porcentaje en peso del magma erupcionado después de ocurrida la mezcla (Y).

Los "output" están representados por la composición del magma y de las fases en equilibrio al final de cada ciclo de fraccionamiento y mezcla, por un determinado número de ciclos establecidos al inicio.

En el modelo estudiado se adoptó como composición inicial del magma contenido en la cámara, la composición andesítica de la colada α_1 y como composición del magma agregado al sistema la de uno de los basaltos del VPR más primitivos encontrados durante el muestreo. La naturaleza y composición de las fases fueron seleccionadas en base a la mineralogía observada (Cuadro 8/3).

Con el objeto de reproducir las variaciones químicas observadas, se establecieron dos ulteriores hipótesis:

- A cada llegada de magma primario al interior de la cámara (Z) corresponde una erupción (Y) de igual volumen ($Y = Z$).
- El número de los ciclos de fraccionamiento-inyección-mezcla-erupción es igual al de las erupciones de lavas observadas en el tramo modelizado.

Debido a que el proceso evolutivo entre la colada α_3 y la colada α_4 resulta anómalo, en el tramo entre la colada α_1 y la colada α_4 , se ha asumido por simplicidad un solo ciclo de inyección-erupción.

Del examen del modelo elaborado se evidencia que la mejor coincidencia entre valores calculados y observados se obtiene con la adición de un 20% de magma profundo respecto al contenido existente en la cámara en el tramo comprendido entre las coladas α_1 y α_6 . En cambio, para la transición hacia términos menos evolucionados (colada α_7) es necesario aumentar la adición de magma profundo hasta un 50%.

— Modelo de alimentación

Los datos disponibles permiten formular un modelo de alimentación del volcán actual que se caracteriza por los siguientes elementos básicos:

- La serie principal de los productos del Volcán El Reventador (VER), se ha generado por un fraccionamiento de tipo gábrico a una profundidad ($P_{tot} = 7.000$ bar).
- El cono actual se encuentra alimentado por una cámara magmática superficial, dentro de la cual se verifican los procesos de cristalización fraccionada y de mezcla por inyección de magma profundo.
- La emisión del basalto de la colada α_7 corresponde a una inversión de la tendencia de evolución del volcán, que a partir de este punto empieza a producir magmas siempre más evolucionados en el transcurso del tiempo. El período evolutivo más reciente puede describirse como un sistema cerrado por debajo y, por lo tanto sin realimentación, que evoluciona progresivamente por efecto de la cristalización fraccionada.
- La determinación de los volúmenes de los magmas emitidos por el volcán y la estimación de sus porcentajes en peso, permiten evaluar el orden de magnitud de los volúmenes de la cámara magmática de El Reventador durante el período en el que estuvieron activos los procesos de mezcla.

Asumiendo un volumen promedio de 25×10^6 m³ para las andesitas emitidas en esta fase (Cuadro 8/1) con una densidad de 2,6 kg/m³, se obtiene un volumen inicial de la cámara de 125×10^6 m³, aproximadamente, (Y promedio = 20%). Además, el modelo prevé que el volumen de la cámara que contiene el líquido vaya reduciéndose en cada ciclo hasta quedar en la mitad, al final del cuarto ciclo.

En lo que se refiere al período evolutivo más reciente, con una tendencia de evolución directa, asumiendo que el sistema no haya sido realimentado, los procesos modelizados imponen una ulterior reducción del volumen de la cámara magmática en un 50%. En conclusión, el volumen de magma actualmente presente debería ser de 30×10^6 m³, aproximadamente. Suponiendo, para simplificar, una geometría esférica de la cámara, su radio debería ser de unos 200 m.

CUADRO 8/3

MODELO DEL SISTEMA DE ALIMENTACION DEL VOLCAN EL REVENTADOR (VER)
(Realimentación-mezcla-fraccionamiento-emisión)

| CICLOS ERUPTIVOS MODELIZADOS | | | | | | | | | | |
|------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Elementos mayores | Magma inicial Colada Q1 | Magma de realimentación Basalto VPR | I | | II | | III | | IV | |
| | | | Calculado | Observado | Calculado | Observado | Calculado | Observado | Calculado | Observado |
| | | | Colada Q4 | | Colada Q5 | | Colada Q6 | | Colada Q7 | |
| SiO2 | 60.75 | 49.92 | 58.21 | 59.39 | 56.17 | 57.28 | 54.49 | 54.97 | 51.72 | 52.29 |
| TiO2 | 0.66 | 1.13 | 0.76 | 0.71 | 0.86 | 0.82 | 0.94 | 0.93 | 1.06 | 1.15 |
| Al2O3 | 18.55 | 20.58 | 18.93 | 18.73 | 19.33 | 18.60 | 19.66 | 19.28 | 20.22 | 19.78 |
| FeO* | 5.15 | 9.43 | 6.42 | 5.96 | 7.18 | 6.78 | 7.80 | 7.29 | 8.78 | 7.92 |
| MnO | 0.13 | 0.16 | 0.14 | 0.14 | 0.15 | 0.13 | 0.15 | 0.15 | 0.16 | 0.15 |
| MgO | 2.25 | 4.57 | 2.72 | 2.35 | 3.16 | 3.28 | 3.52 | 3.77 | 4.14 | 4.20 |
| CaO | 5.86 | 9.11 | 6.52 | 5.89 | 7.12 | 6.71 | 7.62 | 7.42 | 8.50 | 8.50 |
| Na2O | 4.41 | 3.86 | 4.28 | 4.54 | 4.19 | 4.36 | 4.12 | 4.41 | 3.98 | 4.49 |
| K2O | 1.98 | 0.90 | 1.75 | 2.00 | 1.56 | 1.75 | 1.39 | 1.47 | 1.10 | 1.21 |
| P2O5 | 0.24 | 0.34 | 0.27 | 0.28 | 0.29 | 0.28 | 0.31 | 0.31 | 0.34 | 0.34 |
| MgV* | 0.47 | 0.50 | 0.46 | 0.44 | 0.47 | 0.49 | 0.48 | 0.51 | 0.49 | 0.52 |
| DI* | 58.73 | 37.82 | 52.67 | 57.01 | 47.82 | 50.98 | 43.82 | 45.92 | 40.18 | 44.92 |

*: En la base de Fe2O3/FeO = 0.15

NOTAS:

- Para calcular los ciclos eruptivos modelizados I, II, III, se asumió:

Opx = Cpx = 0.02
Pl = 0.01
Mt = 0.01
X = 0.15
Y = Z = 0.2

- Para calcular el ciclo eruptivo modelizado IV, se asumió

OI = Cpx = 0.025
Pl = 0.15
Mt = 0.02
X = 0.22
Y = Z = 0.5

9. EVALUACION DEL RIESGO VOLCANICO

Conforme a lo preconizado por la UNESCO, 1971, el riesgo se define como la posibilidad de una pérdida que pueda afectar a la vida humana, la propiedad, o la capacidad productiva y es considerado como el producto de tres factores: el valor, la vulnerabilidad y la peligrosidad.

El valor puede expresarse a través del número de vidas humanas, del costo material de una propiedad o de la capacidad productiva que estarían expuestas a un determinado peligro.

La vulnerabilidad es una medida de la proporción del valor, antes definido, que podría perderse por efecto de un determinado evento.

La peligrosidad, podría definirse como la probabilidad que una zona determinada pueda estar afectada, dentro de un determinado período, por un fenómeno destructivo. En Vulcanología la peligrosidad representa, por lo tanto, una función compleja de la probabilidad de que un volcán produzca un determinado tipo de erupción y que esta erupción afecte a una zona determinada.

La evaluación cuantitativa de la peligrosidad resulta normalmente muy difícil debido a la imposibilidad de conseguir suficientes datos para efectuar un análisis estadístico confiable respecto al comportamiento eruptivo del volcán. De todos modos, esta evaluación requiere de una reconstrucción precisa de la historia eruptiva del volcán a partir de la cual se puedan obtener indicaciones respecto a los diferentes tipos de eventos eruptivos esperados, a ser analizados en función de la vulnerabilidad potencial ligada a cada evento.

9.1 Actividad histórica del Volcán El Reventador

Los datos históricos sobre la actividad del Volcán El Reventador (VER) son, desafortunadamente, muy escasos.

Debido a su difícil acceso y a su posición aislada y lejana respecto a los centros poblados, el volcán fue oficialmente descubierto sólo en el año 1931 (Paz y Miño L. et al, 1931).

Basándose en las crónicas locales sobre caídas de cenizas y bramidos que, aparentemente, se originaron en la zona de El Reventador, Hantke y Parodi (1966) efectuaron una reconstrucción bibliográfica de la actividad del volcán a partir del año 1541. Hall (1977 y 1980) revisó los datos históricos y estimó que, a partir del año 1541 hasta 1926, ocurrieron, con certeza, por lo menos 14 erupciones.

Almeida y Cruz (1986) consideran confiables sólo los datos posteriores a la erupción del año 1944 entre los cuales se destacan dos periodos de intensa actividad volcánica (1955-1960 y 1972-1976).

Solamente las dos últimas erupciones de este volcán han podido ser observadas y descritas por geólogos (Hall, 1977 y 1980). En base a las informaciones relativas a la actividad histórica y a los resultados obtenidos de los levantamientos geovulcanológicos de campo, resulta que los eventos a ser considerados para evaluar la peligrosidad relacionada con la actividad de El Reventador, pueden ser resumidos como sigue:

- a. Actividad efusiva: - coladas de lava.
- b. Actividad explosiva: - caída de productos piroclásticos
 - flujos piroclásticos
 - explosiones freáticas
 - deslizamientos en masa

Además, deberán considerarse cuidadosamente los peligros relacionados con la inestabilidad de las laderas del volcán, aún cuando estos fenómenos no necesariamente tienen una relación directa con la actividad volcánica.

Los resultados del estudio geológico han permitido establecer que el complejo volcánico de El Reventador está conformado por tres distintos aparatos que se desarrollaron en periodos sucesivos.

La actividad de los primeros dos aparatos, el Complejo Volcánico Basal (CVB) y el Volcán Paleoreventador (VPR), se completó con dos enormes fenómenos de deslizamiento en masa asociados con violentas erupciones piroclásticas y con un probable colapso caldérico. El último deslizamiento ocurrió hace 19.000 años y originó el anfiteatro actual, dentro del cual se ha edificado el cono del Volcán El Reventador (VER). Por lo tanto, parece lógico evaluar la peligrosidad eruptiva tomando como referencia solamente al volcán actual; es decir dentro de un periodo de unos 19.000 años, sin considerar a los fenómenos eruptivos precedentes.

En efecto, no existe ninguna probabilidad que en el tiempo de referencia para la duración de las obras de infraestructura proyectadas en la región, se produzcan fenómenos diferentes a los que ocurrieron en los últimos 19.000 años.

A continuación se examinan todos los aspectos de la peligrosidad, asociados con los eventos volcánicos de El Reventador.

9.2 Peligros relacionados con la actividad efusiva

La emisión de coladas de lava representa, sin duda, el tipo de actividad eruptiva predominante. En efecto, las coladas lávicas constituyen la mayor parte del cono actual y las paredes del anfiteatro; además amplios "campos de lava" se superponen en el interior de la depresión formada por el anfiteatro.

La distancia recomendada por las coladas más recientes varía entre 3 y 6 km; es decir que todas las coladas identificadas se mantienen en el interior del anfiteatro sin llegar a sobrepasar el alto morfológico formado por los materiales del último derrumbe.

Solamente tres coladas han superado esta barrera descendiendo a lo largo de las quebradas de los ríos Marker, Reventador y Engaño. En la quebrada Engaño alcanzaron el punto más bajo que corresponde, aproximadamente, a la cota 1.700 a 6 km del cráter, mientras que en la quebrada del río Reventador se detuvieron en la cota 1.900 a 4,5 km del cráter.

Los frentes más distantes de las coladas lávicas se encuentran alejados del río Coca entre 2 y 2,5 km, mientras que el alto morfológico está a 3,5-4 km de este mismo río.

Los flujos que han logrado superar el alto morfológico del derrumbe, ubicado a unos 4-5 km del cráter central, aprovecharon la mayor pendiente que adquieren las quebradas después de rebasada la barrera del borde del anfiteatro.

Los volúmenes de los flujos de lava que superaron el borde oriental sobresaliente del anfiteatro son siempre modestos. Por lo tanto, podría suponerse que los caudales efusivos de todas las erupciones lávicas del VER, han sido siempre relativamente pequeños y de iguales características, lo que explicaría por qué los flujos alcanzaron solamente distancias del orden de 3-4 km.

Los datos actualmente disponibles no permiten evaluar con seguridad el caudal de emisión característico de las erupciones efusivas de El Reventador. Consecuentemente sólo se puede establecer una evaluación aproximada.

A partir de los mapas y perfiles geológicos que se adjuntan a esta nota, se puede estimar el volumen del cono actual, edificado en los últimos 19.000 años, en $5.000 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Asumiendo una densidad de $2,2 \text{ kg/m}^3$ para el material sólido que constituye el volcán y de $2,5 \text{ kg/m}^3$ para el líquido magmático medio eruptado, se obtiene un volumen total de $4.400 \times 10^6 \text{ m}^3$ de magma, que proporcionaría un valor muy bajo del caudal efusivo medio anual ($0,23 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$) durante los últimos 19.000 años.

Esto representa obviamente un valor mínimo que está muy alejado de los que se verifican durante las erupciones, lo que también podría indicar una frecuencia de erupciones relativamente baja.

El caudal emitido durante una erupción del volcán podría estimarse, aunque en forma bastante incierta, tomando como referencia la última erupción de 1976. Esta incertidumbre se deriva de la falta de datos sobre la duración exacta de la erupción y, especialmente, sobre su terminación y sobre las eventuales interrupciones que pudieron presentarse en la alimentación lávica. Hall (1980) reporta una duración de cuatro meses (enero a abril de 1976). Asumiendo un volumen de lava, estimado con métodos geológicos en $17,8 \times 10^6 \text{ m}^3$, y una duración de la actividad de 110 días, se obtiene un caudal diario promedio de $0,16 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{día}$.

Como dato referencial se indica que este valor resulta inferior en cerca de un orden de magnitud a los caudales medios diarios de los flujos lávicos del volcán Etna en Italia, para el cual se calculó de $0,86$ a $1,3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{día}$ durante la erupción del año 1983, Barberi F. comunicación personal.

Estos bajos valores del caudal de emisión de magma justifican la distancia, relativamente corta recorrida por las coladas lávicas. Además, debe considerarse la dificultad de flujo representada por la elevada viscosidad de las lavas de El Reventador (Cuadro 7/4) que también depende de su avanzado grado de cristalización. Como es notorio, el incremento de la viscosidad está relacionado a:

- La presencia de fases sólidas que obstaculizan el flujo.
- La variación hacia términos ácidos de la composición del líquido residual.
- La temperatura relativamente baja.

En conclusión, tomando en cuenta que:

- A lo largo de toda la historia eruptiva de El Reventador actual (19.000 años) ninguna colada lávica ha llegado hasta el cauce del río Coca.
- Los datos químicos y petrológicos indican claramente una tendencia evolutiva reciente hacia términos progresivamente más ácidos y, por lo tanto, más viscosos.

Se considera poco probable que los flujos de lava que llegue a emitir el cono actual, puedan alcanzar los sitios de las obras de infraestructura, independiente del tiempo necesario para determinar su factibilidad.

La prosecución de la misma tendencia evolutiva hacia composiciones progresivamente más ácidas observada en el último período eruptivo, haría disminuir ulteriormente la posibilidad de

que las coladas lávicas recorran grandes distancias, debido al incremento de la viscosidad. En realidad, para que éstas puedan alcanzar el río Coca, se requeriría un cambio muy importante en las condiciones del volcán, lo que sólo sería posible por una fuerte alimentación de magma básico profundo y un sucesivo incremento del caudal de emisión. Sin embargo en el pasado, la unidad del Volcán El Reventador (VER) ha arrojado lavas muy básicas de origen seguramente profundo (la colada α7), pero el caudal de emisión ha permanecido siempre bastante bajo.

En conclusión, considerando que en los últimos 19.000 años ningún flujo lávico ha alcanzado el valle del río Coca, resulta sumamente improbable que esto pueda ocurrir en el futuro. De todos modos, cualquier ascenso importante de magma profundo podría ser detectado a través de una eficiente red instrumental de monitoreo del volcán.

9.3 Peligros relacionados con la actividad explosiva

a. Caída de materiales piroclásticos

La componente explosiva de las últimas erupciones históricas de El Reventador consiste, fundamentalmente, en proyecciones balísticas de bombas y fragmentos lávicos y en emisión de ceniza a la atmósfera; tratándose por consiguiente de una actividad de tipo estromboliano.

A parte del problema relativo a la formación de flujos piroclásticos, que será tratado en el próximo párrafo, el fenómeno más frecuentemente asociado a las erupciones de El Reventador es la caída de materiales piroclásticos de granulometría muy variable. Los fragmentos más gruesos, bombas, bloques, lapilli, caen en proximidad del cráter, dentro de una zona completamente deshabitada y, por lo tanto, podrían constituir un peligro sólo para las personas que estén casualmente presentes en las cercanías del cráter o bien para los instrumentos científicos que eventualmente se hubieren instalado.

Más complicado resulta el caso de los materiales piroclásticos finos, arenas y cenizas, que pueden ser transportados a grandes distancias desde el centro de emisión.

La energía de la erupción, que determina la altura de la columna eruptiva, la tasa de emisión, la granulometría, la concentración y la densidad de las partículas piroclásticas, junto con la dirección y velocidad del viento en varias cotas, son los principales parámetros que influyen sobre la distribución de los depósitos piroclásticos de caída. La mayoría de estos datos no son conocidos para las erupciones de El Reventador.

La evidencia geológica y fotogeológica indica que los materiales piroclásticos de caída, proveniente del volcán, se distribuyeron predominantemente al oeste del cráter, como lo confirman también las frecuentes informaciones sobre la caída de cenizas de El Reventador en la ciudad de Quito, ubicada al oeste del volcán.

Con el objeto de elaborar mapas de distribución de los productos piroclásticos, se ha procedido a realizar una modelización del fenómeno de caída en condiciones asumidas más próximas a las que, probablemente, existen en el área del volcán, utilizando el método de Armienti et al, (1987).

Los parámetros utilizados para esta simulación son los siguientes y su análisis está a continuación:

- los vientos
- la altura de la columna eruptiva
- la masa emitida
- la velocidad de caída en la columna
- el coeficiente de difusión

— Vientos

Se ha utilizado un campo de vientos de procedencia oriental, con una componente meridional de velocidad nula, asumiendo una velocidad igual en todas las cotas.

Los valores promedio de velocidad del viento fueron obtenidos de los promedios relativos a la circulación atmosférica en las regiones tropicales (Newell et al, 1972).

Datos de INECCEL referentes a valores promedio de la velocidad del viento, medidos sobre el suelo están en el orden de 0,5 m/s, INECCEL 1984, y no influye en la distribución de la ceniza.

Considerada la dispersión de las cenizas provenientes de El Reventador actual, que han llegado hasta Quito, a 95 km al oeste del volcán, se ha procedido a efectuar simulaciones (Figura 33) asumiendo valores de velocidad del viento de 5, 10 y 20 m/s. En efecto, velocidades de 5-7 m/s son comunes cerca del Ecuador terrestre, en cotas superiores a los 1.500 m según se indica en el Cuadro 9/1 (Newell et al, 1972). El valor de 20 m/s puede considerarse como el límite máximo para esta zona.

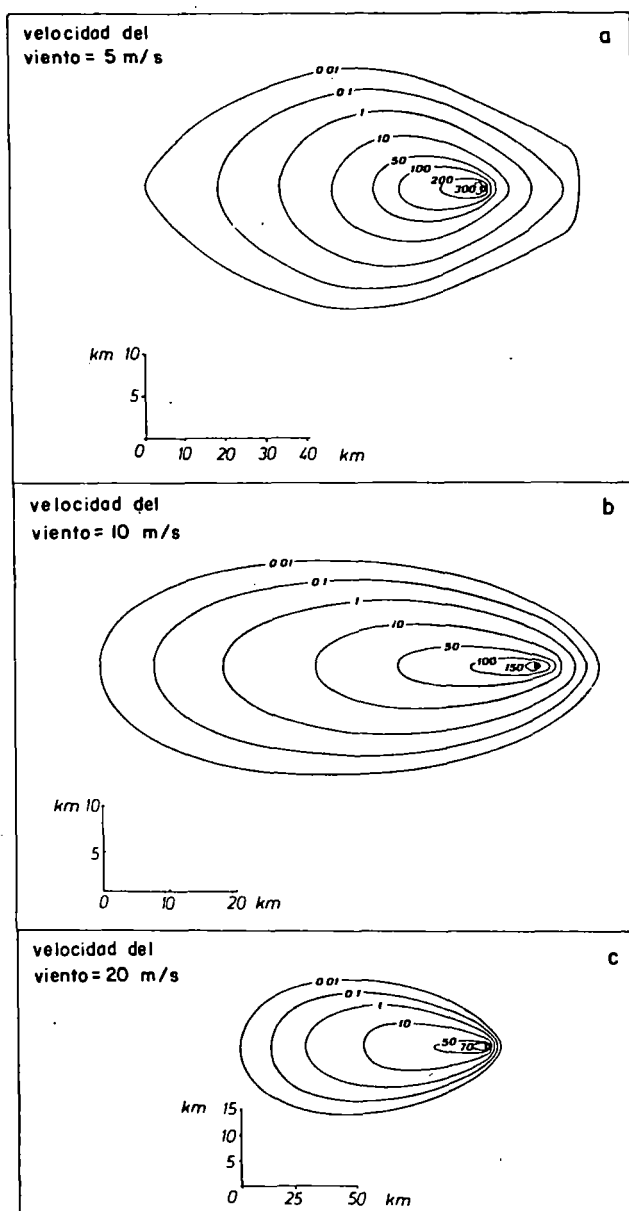


Figura 33.- Volcán El Reventador
Simulación de la caída de los productos piroclásticos

CUADRO 9/1

| VELOCIDAD DEL VIENTO (Componente horizontal; procedencia este; latitud 0° 00') | | | |
|---|-----------|-------------------|--------------|
| P (mbar) | H (km) | Velocidad (m/s) | |
| | | diciembre-febrero | junio-agosto |
| 1.000 | 0,0 | 1,8 - 1,9 | 1,6 - 1,9 |
| 850 | 1,5 | 2,5 - 4,1 | 2,4 - 3,2 |
| 700 | 3,0 | 3,1 - 4,6 | 3,2 - 4,2 |
| 500 | 6,0 | 3,0 - 5,3 | 5,0 - 4,8 |
| 300 | 10,0 | 1,4 - 6,5 | 6,7 - 6,2 |

— Altura de la columna eruptiva

Para las simulaciones del fenómeno se ha asumido una columna eruptiva de 5 km de altura.

La distribución de masa piroclástica en el interior de la columna ha sido calculada en base a la fórmula de Armienti et al, 1987.

Este modelo ha sido calculado a partir de una columna de 5 km de altura y una masa total de piroclastos de 4×10^{10} kg, con un viento oriental de velocidad variable. (Las isomasas están expresadas en kg/m²).

— Masa emitida y velocidad de caída en la columna

En base a las consideraciones sobre el modelo de alimentación del volcán, se obtuvo que la masa total del magma presente en la cámara somera puede ser estimada en 4×10^{10} kg.

Este valor representa el límite máximo apreciable para una erupción del VER que es, por otro lado, muy difícilmente alcanzable puesto que implicaría un completo vaciamiento de la cámara y la emisión total como material piroclástico fragmentado.

Una reducción de este límite aproximaría mejor a los máximos valores probables para las erupciones características del volcán.

Para la modelización del fenómeno se ha repartido la masa piroclástica en cuatro diferentes clases granulométricas, correspondientes a cuatro velocidades de caída (Cuadro 9/2).

CUADRO 9/2

| DISTRIBUCION PORCENTUAL DE LA MASA PIROCLASTICA | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------|
| Clases granulométricas | Velocidad de caída (m/s) | Distribución en peso (%) |
| -1 | 3,4 | 5 |
| 0 | 2,4 | 15 |
| 1 | 1,7 | 60 |
| 2 | 1,2 | 20 |

Las velocidades de caída han sido calculadas analíticamente para altos valores del número de Reynolds, asumiendo una densidad de 2,0 kg/m³ igual para todas las clases granulométricas y un factor de forma de 3,6 tratándose de escorias, piedra pómez y lapilli (según Armienti et al, 1987).

— Coeficiente de difusión

Considerando que la distancia recorrida por las cenizas en las erupciones anteriores es del orden de algunas decenas de kilómetros, se ha asumido un coeficiente de difusión de 2.000 m²/s (Macedonio et al, 1987).

— Resultados de la simulación

Los resultados de la simulación de caída de los productos piroclásticos han sido procesados gráficamente en la Figura 33, donde se presenta un valor total del depósito, correspondiente a la sumatoria de las cuatro clases granulométricas consideradas. Las curvas indican isomasas expresadas en kg/m²

Por otro lado, en el Cuadro 9/3, se indican los valores de concentración de los productos piroclásticos sobre el suelo, a varias distancias a sotavento del cráter, variando la velocidad del viento y la masa en la columna.

CUADRO 9/3

| CONCENTRACION SOBRE EL SUELO DE LOS DEPOSITOS PIROCLASTICOS DE CAIDA | | | | |
|--|--|--|------------------------|--|
| Velocidad del viento (m/s) | Concentración a 10 km a sotavento del cráter | | | |
| | Masa en la columna (kg) | | | |
| | a) 4 x 10 ¹⁰ | | b) 4 x 10 ⁹ | |
| 5 | 200 kg/m ² | | 20 kg/m ² | |
| 10 | 100 kg/m ² | | 10 kg/m ² | |
| 20 | 68 kg/m ² | | 6,8 kg/m ² | |

| Velocidad del viento (m/s) | Concentración a sotavento del cráter | | | |
|-------------------------------|--------------------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| | a 20 km | | a 45 km | |
| | Masa a) | Masa b) | Masa a) | Masa b) |
| 5 | 50 kg/m ² | 5 kg/m ² | 10 kg/m ² | 1 kg/m ² |

Los resultados indican que, aún en el caso más desfavorable, con vientos de 5 m/s procedentes del oriente y abundante masa de material emitido, que son condiciones muy poco probables para el volcán El Reventador, la concentración sobre el suelo del material piroclástico en el área estudiada, a unos 10 km del cráter, no debería causar ningún daño a las infraestructuras existentes y proyectadas.

Se considera por lo tanto despreciable el peligro relacionado con caída de material piroclástico.

b. Flujos piroclásticos

Hall (1977) reporta las siguientes descripciones de la nube eruptiva del Volcán El Reventador durante la erupción de 1976:

"5 de enero: ...una columna de ceniza, de color café y de diámetro muy estrecho, ascendió violentamente del cráter, la cual mantuvo su forma hasta posiblemente 500 m antes de expandirse en una nube en forma de cúmulos, para luego ser llevado hacia el oeste".

"9 de enero: ...la columna de ceniza, de color café rojizo, ascendió unos 1.000 a 1.500 m sobre el cráter...".

"27 de enero: ...eyección explosiva de una nube gris oscura. Después de que la nube había subido unos 600 m, se observó que dos nubes ardientes, de color café rojizo, se desprendieron desde la base de la columna oscura y descendieron violentamente por el flanco nor-oriental".

Estas descripciones corresponden a las de un "jet" volcánico típico de la actividad explosiva, constituido por una nube de gases cargada de partículas piroclásticas ("color café-rojizo o gris oscuro") que forma una columna eruptiva donde, episódicamente, se alcanzan las condiciones para un colapso gravitatorio y, consecuentemente, la formación de peligrosos flujos piroclásticos (Sparks et al, 1978).

La altura máxima que alcanza la columna eruptiva es proporcional a la tasa de emisión.

El colapso de la columna se facilita por la disminución del contenido de gases y por el ensanchamiento del conducto (Wilson et al, 1980). Estos fenómenos ocurren normalmente durante las erupciones de mayor energía, subplíneas o plíneas.

Sin embargo, las descripciones de Hall indican que las condiciones favorables para el colapso de la columna eruptiva se alcanzaron por lo menos una vez durante la erupción del año 1976.

Un depósito con las características de una colada piroclástica, parcialmente recubierto por las lavas más recientes ha sido reconocido durante el mapeamiento geovolcanológico de detalle (coordenadas 9°989.500 m N - 204.500 m E).

Extensos flujos piroclásticos se produjeron al finalizar la actividad del Volcán Paleoreventador. Sin embargo, el aparato actual no presenta las condiciones necesarias para que se produzcan erupciones piroclásticas de esta magnitud.

De todas maneras, aún admitiendo que los fenómenos de este tipo sean modestos y escasos en la actividad del VER, se consideró oportuno evaluar la peligrosidad relativa.

Para tal efecto se adoptó el modelo del cono de energía de Sheridan (1980) y la simulación recientemente elaborada por Armienti y Pareschi (1987).

En base a estos modelos, la distancia recorrida por los flujos piroclásticos originados por el colapso gravitacional de una columna eruptiva y su capacidad de rebasar obstáculos morfológicos, depende de la inclinación y de la altura del cono de energía, es decir de la distancia vertical entre el cráter y la altura alcanzada por el "gas thrust".

A partir de las descripciones de Hall relativas a la erupción del año 1976, se han asumido los valores de 600 y 1.500 m como la mínima y máxima altura de la columna eruptiva.

La distancia máxima recorrida por los flujos piroclásticos, fue estimada en 4,5 km a partir del cráter, hasta alcanzar la cota 1.500 m por debajo del cráter actual.

Con estos datos la inclinación del cono de energía resulta ser de 25° y 34°, respectivamente, (Cuadro 9/4).

Con el mismo método se ha calculado la inclinación del cono de energía que se requiere para que un flujo piroclástico alcance el área del campamento San Rafael, ubicado a 8 km del cráter, que representa una zona de relevante interés para las infraestructuras existentes y proyectadas. Los valores de altura de la columna se mantuvieron iguales a los que se utilizaron en los casos precedentes. En este caso el ángulo de inclinación del cono debería ser de 19° y 24°, respectivamente (Cuadro 9/4).

CUADRO 9/4

| INCLINACION DEL CONO DE ENERGIA | | |
|--|--|--|
| Altura del cono (m) | Distancia entre el cráter y el frente del flujo piroclástico (km) | Inclinación del cono (grados) |
| 600 | 4,5 | 25 |
| 1.500 | 4,5 | 34 |
| 600 | 8,2 | 19 |
| 1.500 | 8,2 | 24 |

Sin embargo, estos resultados requieren de un comentario adicional.

En la literatura se reportan valores del ángulo de inclinación del cono de energía comprendidos entre 35° y 37°. Los ángulos pequeños, inferiores a 10°, han sido observados solamente

en el curso de erupciones de gran energía, con depósitos muy extensos que alcanzaron distancias superiores a los 20 km.

Para los flujos piroclásticos que han llegado hasta distancias comprendidas entre 2 y 15 km, se determinaron conos de energía con un ángulo comprendido entre 17° y 36°.

Consecuentemente se podría deducir que, para que un flujo piroclástico originado por el colapso de una columna eruptiva alcance el campamento San Rafael, se requiere una columna relativamente alta con una energía y un caudal de alimentación mayor de la que ha caracterizado a la actividad histórica de El Reventador.

Erupciones modestas con columnas de unos 600 m de altura, pueden generar flujos piroclásticos cuyos conos de energía presentan ángulos relativamente grandes y, por lo tanto, pequeñas distancias recorridas. En efecto, no se ha observado ningún depósito de colada piroclástica fuera del anfiteatro; también las nubes ardientes, descritas por Hall (1977), terminan a corta distancia del cráter.

Para columnas eruptivas de unos 600 m de altura, sólo valores inusualmente bajos (inferiores a 20°) del ángulo de inclinación del cono de energía, podrían representar un peligro para la zona en estudio o, de modo general, para el valle del río Coca. En la literatura no existen ejemplos de ángulos tan bajos en erupciones de pequeña energía, como las de El Reventador actual.

La probabilidad de que ocurra un evento similar a éste es, por lo tanto, muy baja aún si es que se confirma la tendencia del volcán a producir magmas siempre más evolucionados y, consecuentemente, con una mayor potencialidad explosiva.

Para complementar la evaluación de la peligrosidad debida a los flujos piroclásticos, se ha procedido también a simular el área que estaría afectada por estos en cada uno de los cuatro casos anteriormente considerados (Cuadro 9/5):

CUADRO 9/5

| INCLINACION DEL CONO DE ENERGIA ADOPTADO EN LA SIMULACION | |
|--|--|
| Altura del cono (m) | Inclinación del cono (grados) |
| 600 | 25 |
| 600 | 19 |
| 1.500 | 34 |
| 1.500 | 24 |

En fin, para evaluar los efectos de la morfología, se digitalizó la topografía del volcán.

Los resultados de la simulación elaborada según el modelo de Armienti y Pareschi (1987) se presentan en las figuras 34 y 35, junto con los datos sobre el espesor de los depósitos a lo largo de perfiles preseleccionados.

En estas figuras se representan las cotas digitalizadas del edificio volcánico. La línea quebrada es el límite máximo que alcanzarán los depósitos piroclásticos. En los perfiles topográficos, que aparecen en la parte superior de cada figura, el color oscuro representa el espesor del depósito de caída a lo largo de la línea de perfil indicada.

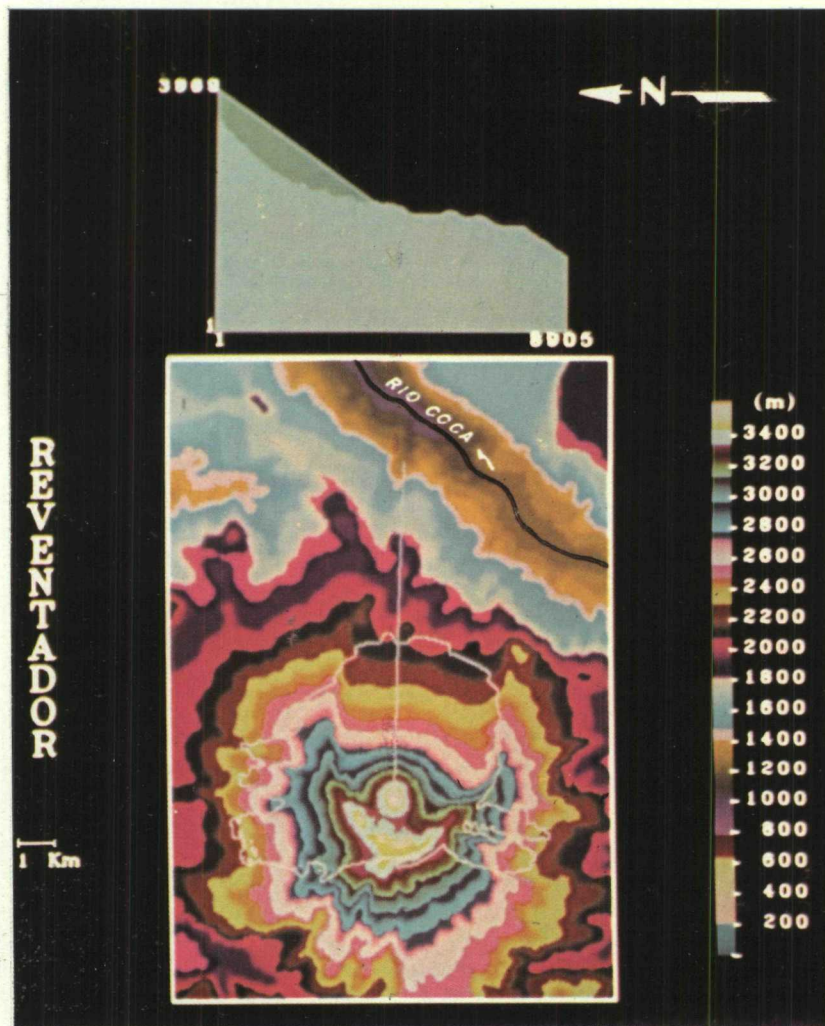
c. Explosiones freáticas

En el fondo del cráter del volcán actual se han reconocido una decena de cavidades de pequeño diámetro, 5 a 20 m, que presentan en su alrededor una ligera acumulación de fragmentos y bloques, ver Mapa Geológico del cráter.

Se trata de cráteres originados por explosiones freáticas de energía muy baja.

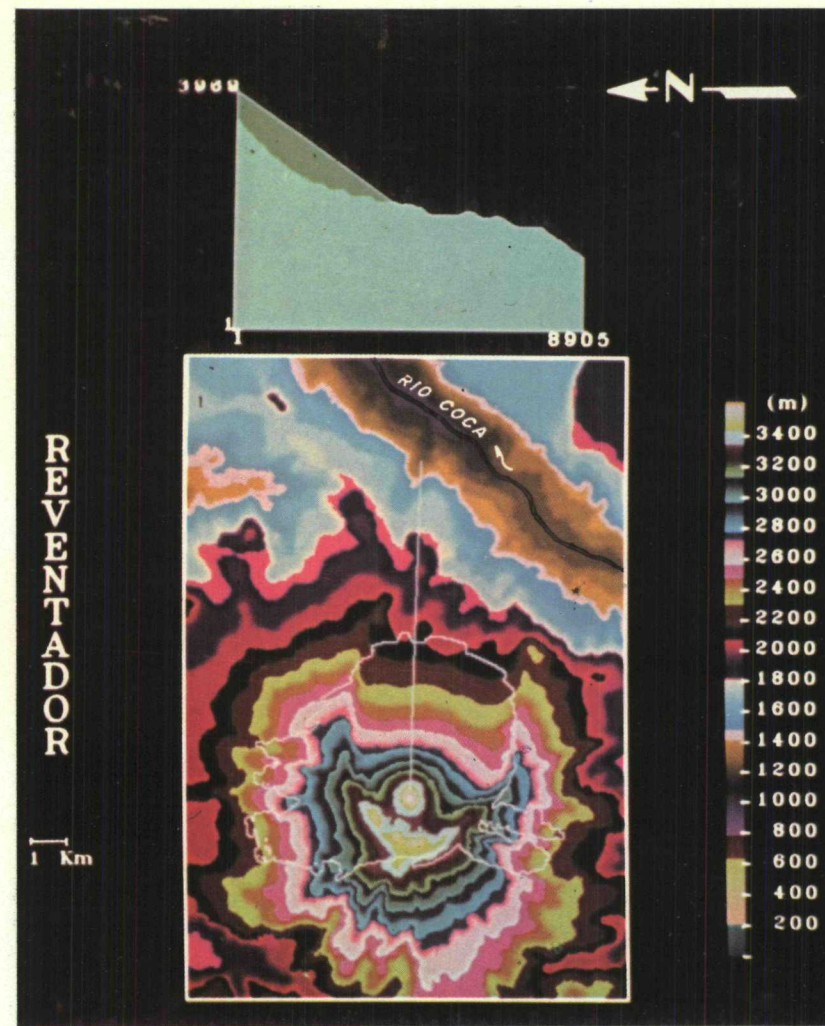
Estas explosiones ocurren cuando la presión de los fluidos (vapor y gases) que se encuentran confinados en el subsuelo bajo una cobertura impermeable, supera a la carga litostática.

Figura 34.- Altura de la columna eruptiva - Caso A y B



CASO A:

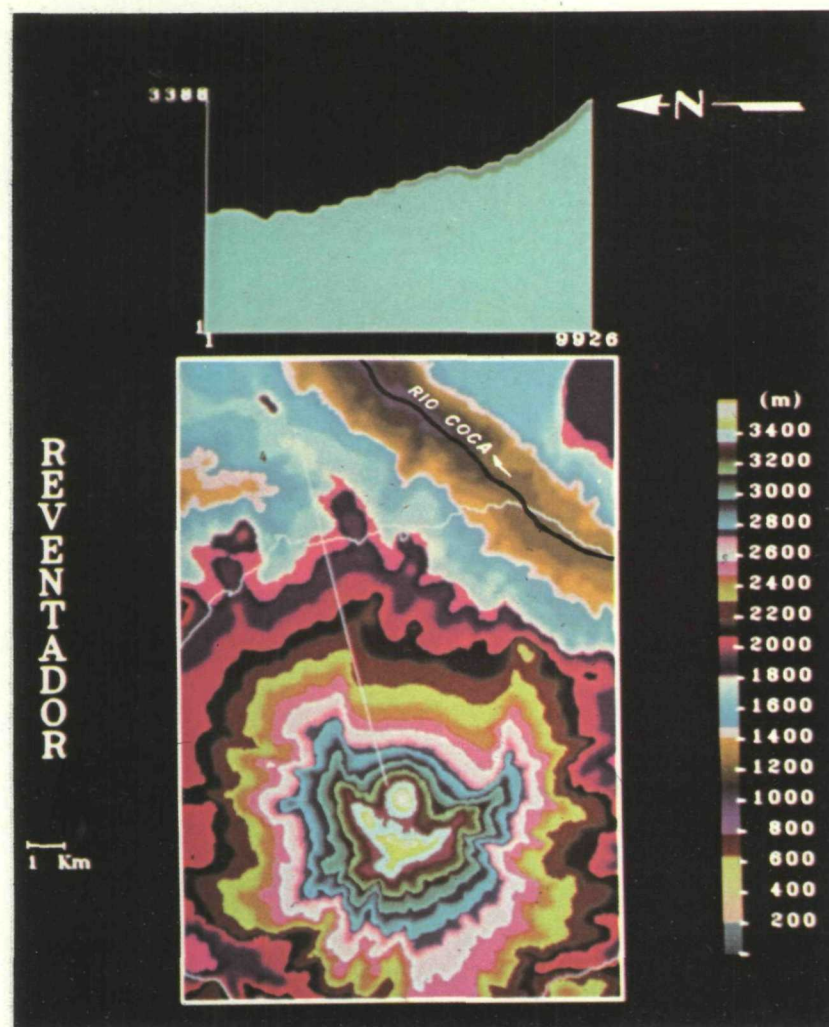
Altura de la columna eruptiva: 600 m; límite del depósito: alto morfológico del borde oriental del anfiteatro; ángulo del cono de energía: 25°



CASO B:

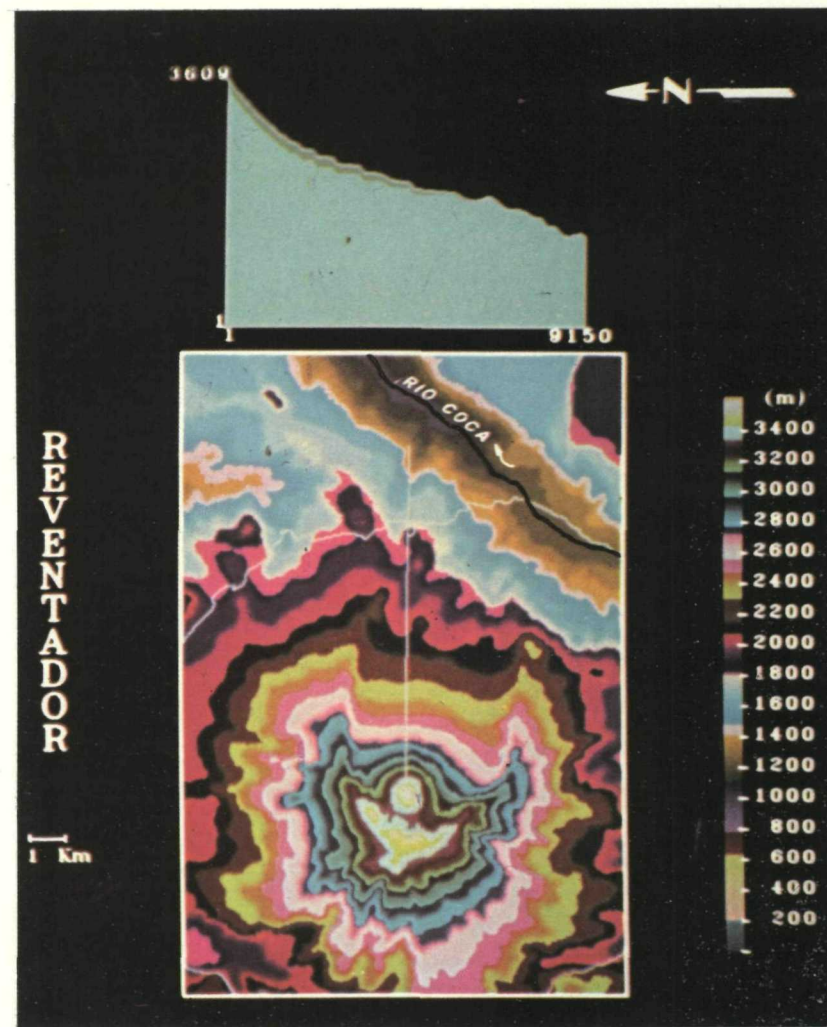
Altura de la columna eruptiva: 1.500 m, límite del depósito: alto morfológico del borde oriental del anfiteatro; ángulo del cono de energía: 34°.

Figura 35.- Altura de la columna eruptiva - Caso C y D



CASO C:

Altura de la columna eruptiva: 600 m; límite del depósito: río Coca;
ángulo del cono de energía: 19°.



CASO D:

Altura de la columna eruptiva: 1.500; límite del depósito: río Coca;
ángulo del cono de energía: 24°.

En el caso de El Reventador se trata de explosiones de pequeña energía, que ocurren debido a la acumulación de los fluidos que forman las fumarolas por debajo de una delgada capa impermeabilizada por fenómenos de autosellamiento.

Por su baja energía, estos fenómenos no representan ningún peligro para los sitios aledaños. Se les menciona únicamente debido a que podrían constituir un peligro para los técnicos que tengan que trabajar en el cráter, o bien porque podrían afectar a los equipos de monitoreo que, eventualmente, se instalen en la zona cratélica.

d. Deslizamientos en masa

Todas las unidades del complejo volcánico El Reventador contienen abundantes depósitos de material deslizado, retrabajado y retransportado, de muy distinta naturaleza y origen.

Considerando la importancia que reviste el exacto reconocimiento de la naturaleza de estos depósitos dentro del proceso de evaluación de los riesgos asociados; para su definición, en el curso de los trabajos de campo, fue adoptada la siguiente nomenclatura, para los tres más importantes fenómenos de este tipo.

— Avalanchas de escombros

Constituyen gigantescos deslizamientos en masa que ocurren por la inestabilidad de los edificios volcánicos con fuertes pendientes y un considerable porcentaje de materiales piroclásticos. Estos deslizamientos pueden o no estar relacionados con movimientos sísmicos. Sus depósitos presentan, en diversos puntos, paquetes donde puede reconocerse la estructura volcánica original; es decir, intercalaciones de lavas con materiales piroclásticos (en general retrabajados) que forman un conjunto muy fracturado.

— Flujos de lodo o lahares

Consisten en flujos, tal vez turbulentos, que engloban a materiales volcánicos finos, saturados de agua, que pueden o no contener bloques y gravas. No presentan ningún tipo de selección o estratificación. Sus depósitos toman el mismo nombre del fenómeno, es decir lahares o depósitos de flujo de lodo.

Los "hyper-concentrated floods", son fenómenos de transporte por agua, en los cuales la relación material transportado/agua es muy elevada. Sus depósitos están formados por bloques de dimensiones variables, gravas, arenas y algunos elementos finos.

En la descripción geológica del volcán se ha visto como dos grandes fenómenos de deslizamiento en masa, que produjeron gigantescos depósitos de avalanchas de escombros, han afectado a su turno a los edificios del Complejo Volcánico Basal y del Paleoreventador. El segundo de estos determinó la formación del gran anfiteatro actualmente visible y el inicio de un nuevo ciclo volcánico. Estos fenómenos fueron causados, muy probablemente, por terremotos asociados con una violenta actividad explosiva que afectaron a los edificios volcánicos y sus laderas inestables.

El edificio del Reventador actual no ha alcanzado el nivel de crecimiento, inestabilidad y evolución magmática de sus antecesores y, por lo tanto, en la actualidad no podría originar fenómenos similares. Sin embargo, podrían ocurrir, más fácilmente, derrumbes y deslizamientos de proporciones mucho más reducidas, que afecten a los taludes externos del anfiteatro actual, según como se ha observado después del terremoto del 5 de marzo de 1987. Estos fenómenos podrían representar un serio peligro para las obras del Proyecto; pero, considerando que su origen es sísmico-hidrogeológico y no volcánico, serán analizados en el informe referente al riesgo sísmico.

Resulta más complejo evaluar la peligrosidad relacionada con el fenómeno de los lahares. En algunos estudios anteriores (Hall, 1980) los depósitos de avalancha de escombros fueron interpretados como lahares y, consecuentemente, se consideró a este fenómeno como el más común y frecuente en El Reventador. Almeida y Cruz (1986) corrigieron oportunamente esta apreciación y redujeron notablemente la estimación inicial sobre la cantidad de lahares en el volcán. Sin embargo, su mapa geológico indica un depósito lahárítico a lo largo del río Reventador, que

habría alcanzado el río Coca. Se debe mencionar que durante los trabajos de campo se han observado, dentro del anfiteatro, varios depósitos laharíticos originados por la movilización de materiales desde el cono actual de El Reventador. Sin embargo, estos depósitos están únicamente restringidos a la parte alta del anfiteatro y no se ha visto ningún lahar que sobrepase el alto morfológico de su borde oriental. Un cuidadoso examen efectuado a lo largo de la parte baja del río Reventador tampoco ha confirmado la presencia de depósitos laharíticos recientes.

Se debe destacar que los flujos de lodo pueden originarse, sin ninguna causa volcánica, por la movilización de materiales sueltos saturados en agua, debido a la acción de las lluvias, tanto en las laderas del cono actual como en los flancos exteriores del anfiteatro. Los de las laderas se canalizarían principalmente por los ríos Marker, Engaño y Reventador; mientras en los flancos exteriores del anfiteatro sólo los que se originen al sur podrían desplazarse a lo largo del río Malo y afectar el área en estudio.

Una vez más debe subrayarse que los flujos de lodo son fenómenos frecuentes bajo las condiciones de inestabilidad de las laderas e hidrológicas particulares que caracterizan toda el área.

En definitiva, esta clase de fenómenos no presenta ninguna relación directa con el volcán y pueden ocurrir como una consecuencia de violentas lluvias o, aún más fácilmente, debido a terremotos. En efecto, muchos de los fenómenos de movilización de material que ocurrieron después del terremoto del 5 de marzo de 1987, podrían clasificarse como flujos de lodo. Por lo tanto, estos fenómenos representan un serio peligro para las obras, las personas y los bienes ubicados a lo largo de los mencionados ríos.

En cuanto se refiere a los lahares de origen volcánico, producidos durante una erupción tanto por fenómenos freatomagmáticos o por movilización de las nubes piroclásticas sueltas emitidas en el curso de ésta y, tomando en cuenta que no existe ninguna evidencia de que lahares de este tipo hayan alcanzado el río Coca durante la historia eruptiva de El Reventador actual, se considera sumamente improbable que esto pueda ocurrir en el futuro.

10. GASES FUMAROLICOS Y MANIFESTACIONES

TERMALES

Muestreos

La zona cratérica del volcán presenta algunas fumarolas que se encuentran tanto en su interior, como en las laderas exteriores. Además, existen en el área del volcán algunas fuentes con termalidad medio-baja (16-25°C).

Estas manifestaciones han sido objeto de una investigación específica dentro del marco de los estudios de Vulcanología, con el fin de establecer las condiciones de su origen y seleccionar algunos puntos aptos para la instalación de un sistema de monitoreo geoquímico del volcán.

En la primera campaña efectuada en el mes de febrero de 1987, se muestrearon cuatro fumarolas ubicadas en la zona cratérica del cono actual, tres fuentes termales y dos aguas superficiales en la zona del anfiteatro.

La segunda campaña de muestreo fue realizada en el mes de mayo de 1987, es decir dos meses después del sismo del 5 de marzo. Fueron muestreadas tres fumarolas y solamente dos puntos de agua en la zona del anfiteatro, pues los demás habían desaparecido a consecuencia de los deslizamientos.

La tercera campaña se llevó a cabo en el mes de septiembre de 1987. Fueron tomadas cuatro muestras de gases fumarólicos y dos muestras de aguas en los mismos sitios muestreados anteriormente. Todos los análisis de aguas y gases fueron ejecutados en los laboratorios del "Instituto de Geocronología y Geoquímica Isotópica" de la Universidad de Pisa, en Italia.

En los Cuadros 10/1 y 10/2 que se adjuntan se indica la procedencia y las determinaciones físico-químicas de campo y de laboratorio de las muestras tomadas de gases y aguas, respectivamente.

Comentarios a los resultados obtenidos

— Metodología de ensayo

Gases

Las muestras de gases fueron analizadas por vía gascromatográfica, en las siguientes condiciones de ensayo:

| | Columna cromatográfica | Carrier gas | Revelador |
|---|-------------------------|-------------|-----------|
| CO ₂ , H ₂ S | Porapak Q (95°C) | He | H.W.D. |
| O ₂ + Ar, N ₂ , CH ₄ | Set. Molecul. 5A (85°C) | He | H.W.D. |
| H ₂ | Set. Molecul. 5A (85°C) | Ar | H.W.D. |
| CO | Set. Molecul. 5A (85°C) | He | H.I.D. |

CUADRO 10/1

VOLCAN EL REVENTADOR

ANALISIS QUIMICOS DE AGUAS Y GASES

CUADRO RESUMEN DE LOS RESULTADOS

ANALISIS DE GASES

| Denominación de la muestra | Ubicación | Determinaciones de campo | | Determinaciones químicas de laboratorio (en volumen) | | | | | | | |
|-------------------------------------|--|-----------------------------|------------------|---|-------|-------|------|--------|--------|-----|-------|
| | | Cota | Tempe- ratura | C02 | H2 | O2+Ar | N2 | CH4 | CO | H2S | Total |
| | | (msnm) | t(°C) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) |
| PRIMER MUESTREO (3-6 feb 1987) | | | | | | | | | | | |
| R-01-1 | Borde oriental del cráter | 3.540 | 87.2 | 1.57 | 0.208 | 20.7 | 77.3 | < 0.02 | 0.0003 | 0.0 | 99.78 |
| R-01-2 | Borde oriental del cráter | 3.540 | 87.2 | 1.67 | 0.256 | 20.7 | 77.2 | < 0.02 | 0.0004 | 0.0 | 99.83 |
| R-02-1 | Interior del cráter, costado suroccidental | 3.510 | 86.5 | 0.30 | 0.097 | 21.4 | 78.1 | < 0.02 | 0.0001 | 0.0 | 99.90 |
| R-02-2 | Interior del cráter, costado suroccidental | 3.510 | 86.5 | 0.10 | 0.077 | 21.8 | 78.1 | < 0.02 | 0.0001 | 0.0 | 99.98 |
| SEGUNDO MUESTREO (7-8 may 1987) | | | | | | | | | | | |
| R-11-1 | Borde nororiental del cráter | 3.550 | - | 0.08 | 0.045 | 21.7 | 77.5 | < 0.02 | 0.0001 | 0.0 | 99.32 |
| R-11-2 | Borde nororiental del cráter | 3.550 | - | 13.50 | 8.100 | 7.5 | 70.4 | - | - | 0.0 | 99.50 |
| R-12-1 | Interior del cráter, costado meridional | 3.505 | - | 0.41 | 0.107 | 21.6 | 77.1 | < 0.02 | 0.0002 | 0.0 | 99.12 |
| TERCER MUESTREO (22-25 sep 1987) | | | | | | | | | | | |
| R-21-1 | Borde nororiental del cráter | 3.550 | - | 0.70 | 0.216 | 21.2 | 77.8 | < 0.02 | 0.0002 | 0.0 | 99.92 |
| R-21-2 | Borde nororiental del cráter | 3.550 | - | 0.36 | 0.133 | 21.5 | 78.0 | < 0.02 | 0.0003 | 0.0 | 99.99 |
| R-22-1 | Interior del cráter, costado meridional | 3.505 | - | 0.07 | 0.006 | 21.6 | 77.9 | < 0.02 | 0.0001 | 0.0 | 99.57 |
| R-22-2 | Interior del cráter, costado meridional | 3.505 | - | 0.04 | 0.008 | 21.6 | 77.8 | < 0.02 | 0.0001 | 0.0 | 99.44 |

CUADRO 10/2

VOLCAN EL REVENTADOR
ANALISIS QUIMICOS DE AGUAS Y GASES
CUADRO RESUMEN DE LOS RESULTADOS
ANALISIS DE AGUAS

| Denominación de la muestra | Ubicación | Determinaciones físico-químicas de campo | | | | | | | Determinaciones químicas de laboratorio | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|---|--|------------------|---------|--------------------|---------|--------|--------|---|----------------|----------------|---------------|----------------|--------------|-------------|----------------|---------------|------------|------------|-----------|
| | | Cota | Tempera- tura | pH | Conduc- tividad | Caudal | SiO2 | HCO3 | Ca | Mg | Na | K | Li | HCO3 | SO4 | CL | F | NO3 | B | SiO2* |
| | | (msnm) | t(°C) | | (μS/cm) | (l/seg) | (mg/l) | (mg/l) | (mg/l) | (mg/l) | (mg/l) | (mg/l) | (mg/l) | (mg/l) | (mg/l) | (mg/l) | (mg/l) | (mg/l) | (mg/l) | (mg/l) |
| PRIMER MUESTREO (3-6 feb 1987) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| R-01 | Quebrada río Reventador | 1.840 | 21,1 | 6,5-7,0 | 1.298 | 40 | 87,5 | 3,7 | 26,6 1,33 | 90,5 7,44 | 75,5 3,28 | 11,55 0,30 | 0,097 0,014 | 220 3,6 | 296 6,17 | 99,4 2,80 | 1,33 0,07 | < 0,7 - | 0,138 - | 66,9 - |
| R-02 | Quebrada al N del río Reventador | 1.480 | 20,9 | 7,5-8,0 | 1.048 | 1 | 95,0 | 3,2 | 23,1 1,15 | 71,5 5,88 | 60,3 2,62 | 9,77 0,25 | 0,081 0,012 | 183 3,0 | 230 4,79 | 78,1 2,20 | 1,08 0,057 | < 0,7 - | 0,125 - | 61,4 - |
| R-03 | Quebrada aguas abejo de la cascada San Rafael | 1.120 | 25,5 | 7,5-8,0 | 2.100 | 3 | 102,5 | 9,8 | 96,0 4,79 | 97,0 7,98 | 172,40 7,50 | 12,77 0,33 | 0,260 0,037 | 567 9,3 | 383 7,98 | 117,20 3,31 | 0,78 0,041 | < 0,7 - | 0,500 - | 74,0 - |
| R-04 | Afluente derecho del río Marker | 2.050 | 16,2 | 7,0-7,5 | 690 | 50 | 100,0 | 3,4 | 10,8 0,54 | 35,7 2,94 | 27,7 1,20 | 3,30 0,08 | 0,030 0,004 | 195 3,2 | 40 0,83 | 29,5 0,83 | 1,08 0,057 | < 0,7 - | 0,085 - | 50,2 - |
| R-05 | Quebrada Agua Azul | 2.060 | 18,2 | 8,5-9,0 | 2.100 | 100 | 130,0 | 13,0 | 50,3 2,51 | 163,5 13,45 | 56,6 2,46 | 6,08 0,16 | 0,084 0,012 | 799 13,1 | 172 3,58 | 74,6 2,10 | 1,17 0,062 | < 0,7 - | 0,163 - | 75,9 - |
| SEGUNDO MUESTREO (7-8 may 1987) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| R-11 | Quebrada río Reventador | 1.840 | - | - | - | - | - | - | 34,0 1,70 | 106,3 8,74 | 81,5 3,54 | 11,86 0,30 | 0,102 0,015 | 268 4,39 | 340 7,08 | 106,1 2,99 | 1,49 0,078 | < 0,7 - | 0,168 - | 66,3 - |
| R-15 | Quebrada Agua Azul | 2.060 | - | - | - | - | - | - | 42,2 2,11 | 129,0 10,61 | 51,0 2,22 | 6,02 0,15 | 0,072 0,010 | 615 10,08 | 147 3,06 | 61,2 1,73 | 1,08 0,057 | < 0,7 - | 0,148 - | 72,3 - |
| TERCER MUESTREO (22-25 sep 1987) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| R-21 | Quebrada río Reventador | 1.840 | - | - | - | - | - | - | 36,6 1,83 | 116,0 9,54 | 92,3 4,01 | 13,65 0,35 | 0,110 0,016 | 274 4,5 | 380 7,92 | 116 3,27 | 1,53 0,08 | < 0,2 - | 0,17 - | 71,3 - |
| R-25 | Quebrada Agua Azul | 2.060 | - | - | - | - | - | - | 48,4 2,42 | 169,0 13,90 | 58,0 2,52 | 5,87 0,15 | 0,08 0,011 | 817 13,4 | 170 3,54 | 69 1,95 | 1,22 0,06 | < 0,2 - | 0,15 - | 77,2 - |

* Los valores de SiO2 medidos en el campo resultan más altos que los determinados en laboratorio sobre las muestras no modificadas.
Los valores de SiO2 obtenidos en el laboratorio sobre las muestras de agua diluidas 1:10, resultan aproximadamente 10 veces más altos que los valores obtenidos en el laboratorio sobre las mismas muestras no diluidas. Esto significa que el diluyente tenía un contenido en SiO2 similar al de las muestras naturales.

Aguas

Las muestras de aguas fueron analizadas en base a los siguientes métodos de ensayo:

| | |
|---------------|--|
| Ca, Mg, Na, K | Espetrofotometría de absorción atómica |
| Li | Espetrofotometría de emisión atómica |
| HCO3 | Potenciometría |
| SO4, Cl, NO3 | Cromatografía iónica |
| F | I.S.E. (de electrodo específico) |
| B | Espetrofotometría VIS (con curcumina) |
| SiO2 | Espetrofotometría VIS (con molibdato) |

— Resultados obtenidos

Gases

Todas las muestras tomadas en el curso de la primera y segunda campaña, excepto la R-11-2, resultaron fuertemente contaminadas por aire (Cuadro 10/1).

La relación $N_2/(O_2+Ar)$ se encuentra muy próxima al valor atmosférico, con una tendencia hacia un ligero empobrecimiento en O_2+Ar que podría atribuirse, para el caso de las seis muestras más contaminadas, a la mayor solubilidad del O_2 respecto al N_2 (Figura 36).

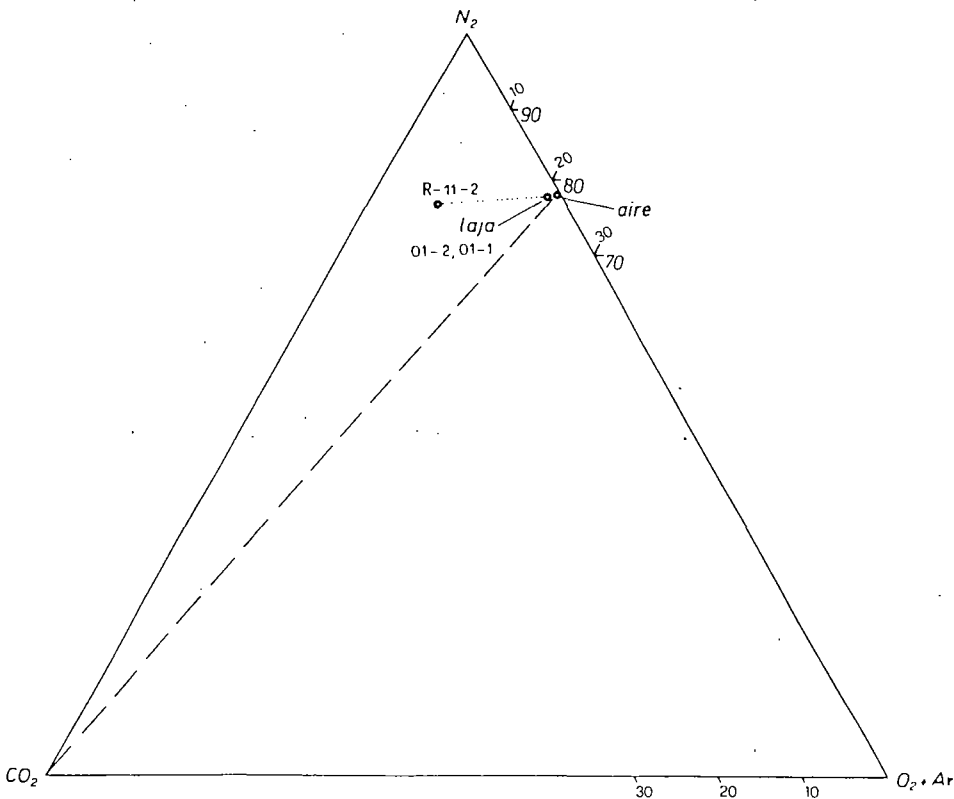


Figura 36.- Gases fumarólicos del Volcán El Reventador (VER)
Diagrama triangular $CO_2/N_2/(O_2+Ar)$

Para la muestra R-11-2 el exceso de N_2 sobre (O_2+Ar) resulta tan grande que no podría explicarse mediante un simple mecanismo de diferencias de solubilidad entre O_2 y N_2 . En este caso, el fluido que alcanza la superficie debe, necesariamente, estar previamente enriquecido en N_2 .

Los altos valores que presentan las relaciones H_2/CO_2 y CO/CO_2 se deben, muy probablemente, a la solubilidad en agua (condensado) mucho más grande del CO_2 respecto a los otros dos componentes (50 veces más alta a temperatura ambiente).

Los análisis deberían ser corregidos por esta causa; sin embargo, esta corrección no resulta fácil considerando que dichas relaciones se encuentran también influenciadas por la cinética de la separación de la fase gaseosa del condensado y, consecuentemente, por la metodología empleada para el muestreo.

Tomando en cuenta que el H_2 y el CH_4 presenta una solubilidad en agua similar, deberían destacarse los valores siempre muy elevados de las relaciones H_2/CH_4 que se han determinado en todos los análisis. Esto representa una evidencia de temperaturas elevadas en la zona de origen de los fluidos.

Sin embargo, considerando que son múltiples los procesos que han afectado la composición química de los fluidos en su viaje desde la zona de origen profundo hasta el laboratorio, y que estos no pueden establecerse cuantitativamente, no se ha considerado conveniente efectuar evaluaciones termométricas.

El nivel de contaminación por aire sigue siendo muy elevado también en las muestras tomadas en el curso de la tercera campaña ($O_2 + Ar + N_2 = 99,0 - 99,5\%$).

En ninguna de las muestras fue detectada la presencia de H_2S , mientras que el porcentaje en volumen de CH_4 resulta siempre inferior al límite determinable con el detector de conductibilidad térmica.

Los valores de H_2/CO_2 concuerdan bastante en las muestras tomadas de las fumarolas en el borde del cráter mientras difieren mucho en las muestras tomadas de las fumarolas en el interior del cráter. Sin embargo, esta variación no es sorprendente si se considera el nivel extremadamente bajo de CO_2 y su afinidad por la fase líquida.

El desarrollo en el tiempo de los resultados analíticos relativos a estas dos fumarolas puede ser, tentativamente, previsto en base a la variación de los valores de H_2/CO_2 .

En las fumarolas ubicadas en el borde del cráter el valor H_2/CO_2 ha registrado un importante incremento en las muestras tomadas después del sismo del 5 de marzo de 1987. Cabe notar que los resultados obtenidos se repiten también en las muestras dobles, aparte de su grado de contaminación.

Las fumarolas ubicadas en el interior del cráter han registrado; en general, un comportamiento diverso que puede depender de varios factores como la dudosa reproducción de los resultados y la posibilidad que las dos fumarolas muestreadas sean alimentadas por sistemas diferentes, los mismos que estarían caracterizados por diferentes condiciones de "stress" en profundidad.

De todas maneras, los datos analíticos indicarían que el sistema fumarólico ha reaccionado a consecuencia del sismo.

La escasa frecuencia de las determinaciones realizadas hasta la fecha no permite definir si la composición de los compuestos de hierro han variado antes o después del sismo.

Aguas

En base a los diagramas de Langelier-Ludwig, las muestras de aguas tomadas en el curso de la primera y segunda campaña pueden clasificarse como aguas sulfatadas-cloruradas alcalino térreas (muestras R-01, R-02, R-03 y R-11) y como aguas bicarbonadas-alcalino térreas (muestras R-04, R-05 y R-15), (Cuadro 10/2 y Figura 37).

La salinidad varía desde un factor 2, en el interior del primer grupo a un factor 5 en el segundo.

Todas las aguas se encuentran en desequilibrio con los feldespatos (Figura 38) y su circulación dentro de rocas hidrotermalizadas parece haber contribuido parcialmente al proceso de mineralización.

En base a las pocas muestras disponibles, resulta difícil identificar y reconstruir cuantitativamente los eventuales procesos de mezcla. Sin embargo, en vista que las muestras R-11 y R-15

representan una duplicación de R-01 y R-05, respectivamente, las variaciones de composición observadas entre el primero y el segundo muestreo, sugieren la existencia de procesos de mezcla en el interior de las dos familias antes definidas. Esto resulta, más evidente para las muestras R-05 y R-15 que para las R-01 y R-11.

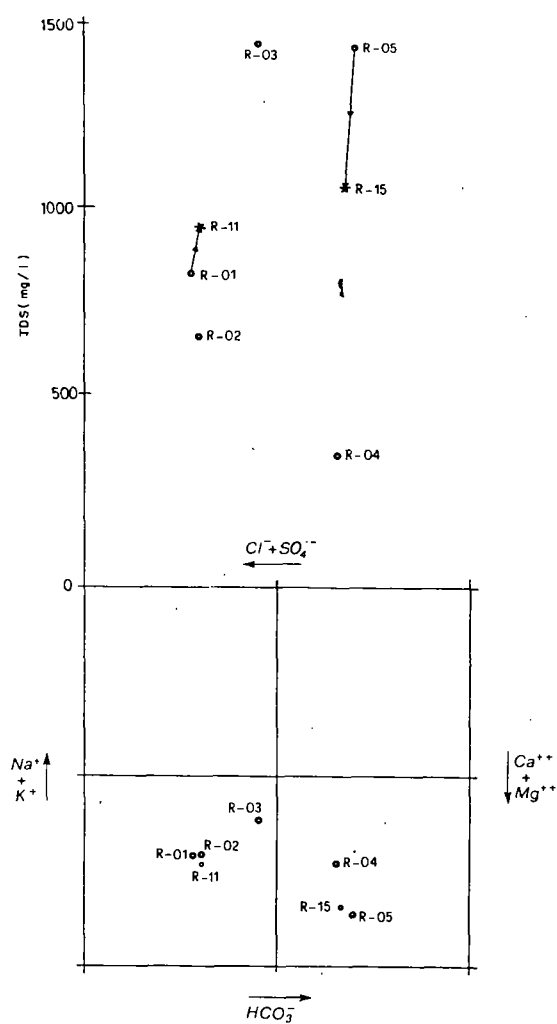


Figura 37.- Aguas del Volcán El Reventador (VER)
A) Comparación entre Salinidad Total (TDS) y Cloruros + Sulfatos
B) Diagrama clasificativo de Langelier - Ludwig

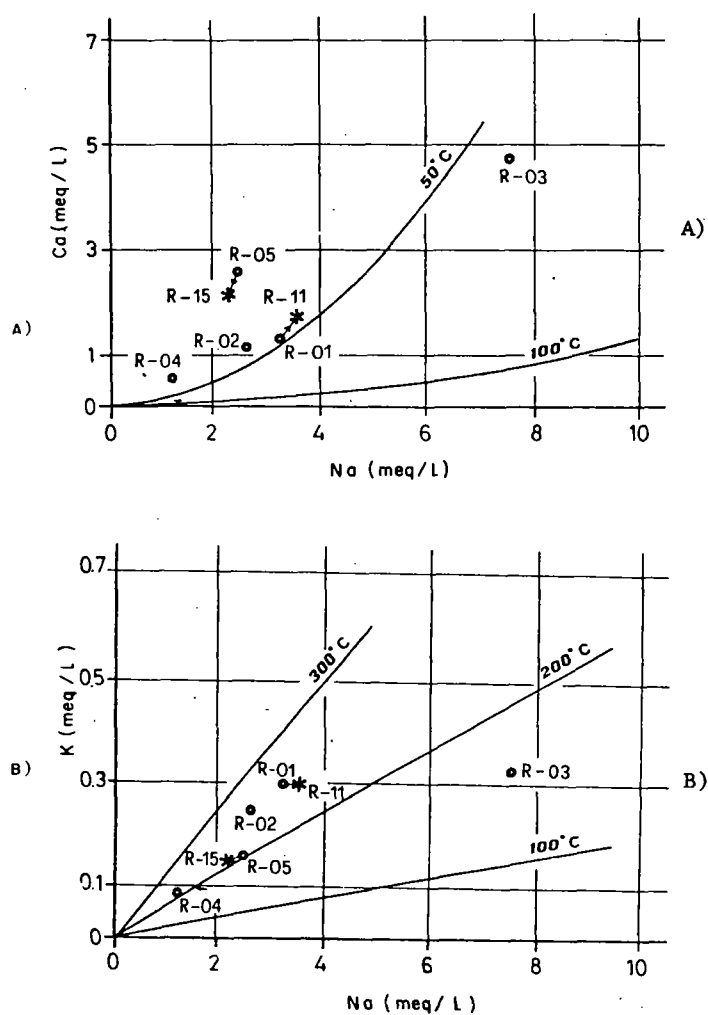


Figura 38.- Aguas del Volcán El Reventador (VER)
Diagrama calcio/sodio y potasio/sodio

En el diagrama boro/cloro (Figura 39) sólo la muestra h-03 presenta una relación claramente más alta que en las otras aguas y fuera de cualquier proceso de mineralización "normal". Esto resulta todavía más evidente en el diagrama boro/salinidad total (Figura 40).

Entre los procesos que podrían determinar un enriquecimiento particularmente importante en boro, se encuentra la ebullición de acuíferos muy calientes. En este caso tendrían que estar necesariamente relacionados con el sistema hidrotermal del volcán.

En el curso de la vaporización, los elementos o compuestos altamente volátiles migran hacia la superficie mezclándose en los acuíferos más superficiales y más fríos. Reconocer estos fenómenos es muy importante para la selección de los puntos de muestreo que deberían mantenerse bajo control para el monitoreo del volcán.

La hipotética existencia de procesos de mezcla entre las dos familias de aguas, reconocidas en las muestras tomadas en el curso de la primera y segunda campaña, ha sido confirmada en base a los resultados de los análisis realizados sobre las dos muestras tomadas en el curso de la tercera campaña. En efecto, fueron registradas significativas variaciones en la composición debido a evidentes procesos de mezcla.

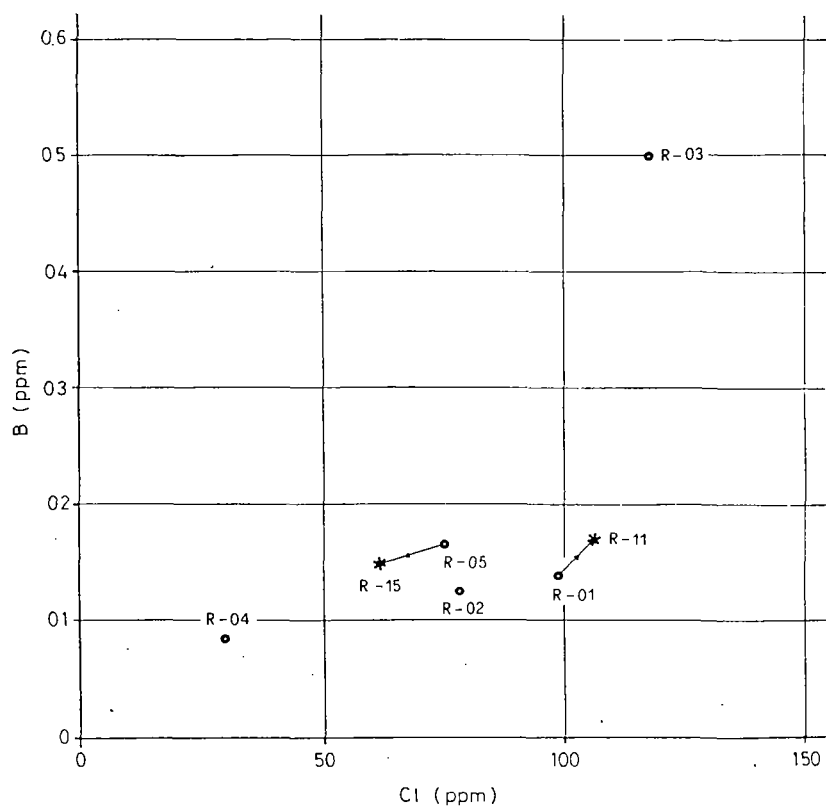


Figura 39.- Aguas del Volcán El Reventador (VER)
Diagrama boro/cloro

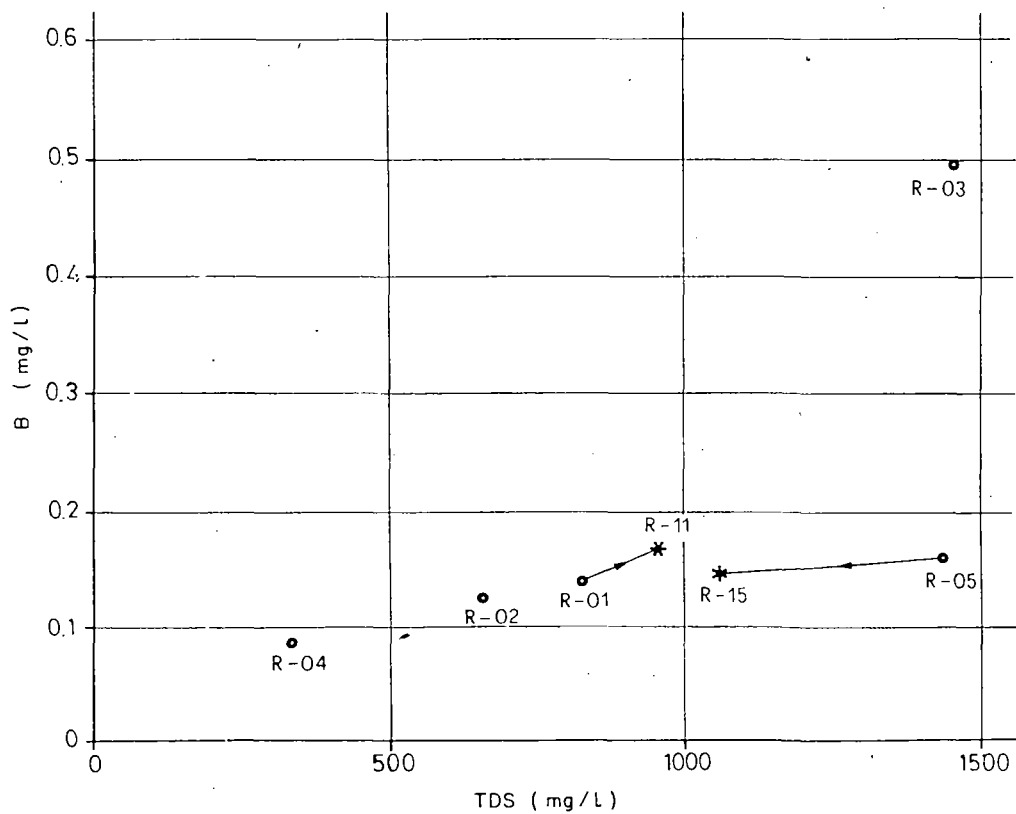


Figura 40.- Aguas del Volcán El Reventador (VER)
Diagrama boro/salinidad total (TDS)

Por lo tanto, tomando en cuenta solamente los datos de las aguas termales muestreadas en la quebrada del río Reventador (muestras R-01, R-11 y R-21) y los datos de las aguas de la quebrada Agua Azul (muestras R-05, R-15 y R-25), siendo que los demás puntos de aguas han desaparecido a consecuencia del sismo, se observa que:

- La proyección de cada punto de ensayo sobre la base de la pirámide de Langelier-Ludwig, evidencia pequeñas variaciones entre ellos, aunque la salinidad total por cada grupo de tres muestras varía en casi un 30%.
- En los diagramas entre los componentes principales B/C1 y B/TDS las variaciones se evidencian a lo largo de líneas rectas pasantes por el origen del sistema de coordenadas (Figuras 39 y 40).

Esto llevaría a suponer que el agua lluvia influencia de manera significativa la composición química de las aguas muestreadas. Este dato resulta más evidente para las aguas de la quebrada Agua Azul que presenta una fluctuación de signo opuesto pasando del primero al segundo muestreo y del segundo al tercero.

Por lo que se refiere a las aguas termales de la quebrada del río Reventador, se observa un aumento constante de la salinidad total, lo que indicaría un crecimiento del concurso de la componente termal, o una nueva influencia del agua lluvia en el proceso de mezcla.

Los datos analíticos evidencian significativos cambios en la composición en coincidencia del evento sísmico de marzo de 1987.

Pero, por el tipo de variaciones y por la falta de informaciones sobre los cambios de composición de las aguas de un mismo manantial durante un período más largo, de por lo menos un año, no resulta posible afirmar si existe una relación de causa y efecto entre el evento sísmico y las variaciones químicas registradas.

Conclusiones

La existencia de algunos problemas relacionados con la fuerte contaminación de aire en los gases y las evidencias químicas de desequilibrio en las aguas, impiden la aplicación de las técnicas geotermométricas que se utilizan normalmente para estimar la temperatura de origen de los fluidos.

A pesar de estas dificultades, ha sido posible establecer lo siguiente:

- Las fumarolas del cráter tienen una elevada relación H_2/CH_4 , que resulta indicativa de altas temperaturas en la zona de origen de los gases.
- La fuente termal en el sector de la cascada San Rafael (muestra R-03), que presenta la temperatura más alta (25,5°C), evidencia un contenido anómalo en boro, indicio de una posible conexión con el sistema hidrotermal profundo del volcán.

Estos resultados sugieren que, tanto las fumarolas del cráter, como la fuente termal indicada, debido a su eventual conexión con el sistema profundo y caliente del volcán, representan puntos aptos para un monitoreo geoquímico. En efecto cualquier reanudación de la actividad eruptiva debería estar precedida por variaciones significativas en la composición de los gases y del agua termal que estarían representadas particularmente por el incremento de los componentes de origen magmático o relacionados a equilibrios de alta temperatura.

11. MONITOREO DEL VOLCAN

EL REVENTADOR

El monitoreo de un volcán activo en estado de reposo temporal, como es El Reventador actualmente, consiste en la utilización de métodos geofísicos para el control de la sismicidad y de las deformaciones del suelo y geoquímicos para el control de las fumarolas y fuentes termales.

El objetivo de estos métodos es el de detectar la presencia de condiciones eruptivas con suficiente anticipación para permitir la puesta en marcha de los planes de emergencia establecidos con anterioridad.

El programa de control que se propone a continuación, ha sido diseñado con miras a asegurar el control permanente de la actividad del volcán, mediante un sistema de dimensiones mínimas.

La red microsísmica prevista en el ámbito del Proyecto Hidroeléctrico Coca-Codo Sinclair, debería incluir también dos estaciones sísmicas telemétricas instaladas en el anfiteatro del volcán.

A través de estas estaciones se podrán obtener importantes datos sobre la actividad sísmica actual del volcán, interesantes tanto desde un punto de vista vulcanológico como neotectónico. Además estos datos serán muy útiles para la selección de los sitios más adecuados para la instalación de las estaciones sismométricas permanentes.

Monitoreo sísmico

Para el monitoreo de la actividad de un volcán resulta sumamente importante disponer de una red de control de la sismicidad local.

Dicha red tiene que diseñarse de forma que permita la adquisición en tiempo real, o casi real, de datos precisos referentes a la distribución espacio-temporal de los eventos sísmicos; es decir, la magnitud, el "momentum" y el mecanismo focal.

Para una diagnosis correcta, es particularmente importante disponer de datos epi-hipocentrales exactos que permitan identificar la zona de abertura de la boca eruptiva y la posición del magma respecto a la superficie. Los resultados de las investigaciones más recientes en este campo indican que para eso es necesario disponer de algunos sismómetros de tres componentes que permiten apreciar las diferencias entre ondas P y S.

En el caso de El Reventador se estima conveniente instalar una red de tres estaciones sismométricas de tres componentes, cada una de las cuales estaría compuesta por un sistema de amplificación, VCO, mixer y un sistema de alimentación y teletransmisión.

El sistema debe prever la teletransmisión automática de los datos vía radio a un centro de control.

Monitoreo geofísico

El control de las deformaciones del suelo de un volcán activo representa, junto con el de la actividad sísmica, la más apropiada técnica geofísica de monitoreo.

Las erupciones volcánicas están generalmente precedidas por fenómenos de levantamiento del suelo del edificio volcánico cuya geometría y variación temporal permiten identificar la profundidad y la energía de la fuente de la deformación, es decir la profundidad y la presión del magma.

Aparte de las técnicas tradicionales de levantamiento topográfico de precisión, altimétrico y distanciométrico, en los últimos años se ha desarrollado una técnica inclinométrica ("bore hole tiltmetry") específica para el monitoreo volcánico. Este método tiene la ventaja de poder utilizar redes telemétricas para una adquisición continua de las informaciones y, consecuentemente, la posibilidad de efectuar comparaciones permanentes entre actividad sísmica y deformación del suelo.

Para el volcán El Reventador, se sugiere la instalación de dos estaciones inclinométricas de alta sensibilidad, equipadas con teletransmisión.

Estos inclinómetros podrían instalarse en dos de los sitios de las estaciones sísmicas en el interior del anfiteatro, para reducir los problemas de alimentación-transmisión y los gastos de mantenimiento; la señal será transmitida al mismo centro de control.

El funcionamiento del centro de control donde se recibirán las señales transmitidas vía radio por las estaciones sismométricas e inclinométrica, deberá ser permanente. El centro dispondrá de computadoras y programas de cálculo para la elaboración en un tiempo muy reducido de todos los datos.

Se deberá igualmente asegurar una conexión radio permanente y eficiente entre el centro y la dirección operacional del sistema que será la responsable de la ejecución de los planes de emergencia.

Estos planes podrán ser activados después de recibido un aviso de alerta desde el centro de control, según un esquema técnico-operacional que deberá establecerse con anterioridad, definiendo también diferentes grados de las señales de alerta, en función de la intensidad de los fenómenos registrados por el sistema de monitoreo del volcán.

Monitoreo geoquímico

Los gases contenidos en el magma se desplazan con mucha más facilidad que éste y, por lo tanto, ascienden más rápidamente hacia la superficie durante el proceso pre-eruptivo. Ellos pueden alcanzar directamente la superficie dando lugar a las fumarolas, o mezclarse con acuíferos de diferente profundidad, que, a su vez, pueden alimentar fuentes termales.

De todas formas, las fumarolas y las fuentes termales existentes en zonas volcánicas activas presentan significativas variaciones químicas o químico-físicas en el período precedente a la reanudación de la actividad eruptiva. Estas variaciones se deben al ascenso preferencial de los gases juveniles a lo largo de las fracturas creadas por el magma que trata de abrirse paso hacia la superficie, y son consideradas como indicios premonitores de la actividad volcánica.

Los resultados analíticos reportados anteriormente permiten elegir dos sitios aptos para un monitoreo geoquímico del volcán: las fumarolas cratéricas y la fuente termal en el sector de la cascada San Rafael.

Ambos puntos tendrán que ser objeto de un muestreo periódico y sistemático con una frecuencia tri o cuatrimestral, que podría ser incrementada en caso de que se presente una actividad sísmica o un levantamiento anómalo del terreno.

Además, será conveniente crear las condiciones para que se puedan efectuar en el país los análisis de aguas y gases con la precisión requerida, evitándose así las demoras debidas a la necesidad de enviar las muestras a laboratorios especializados en el extranjero.

12. SINTESIS DE LOS RESULTADOS

Los estudios realizados han permitido obtener un notable progreso en el grado de conocimiento del complejo volcánico El Reventador y de elaborar un modelo geológico y petrológico confiable que constituye la base indispensable para evaluar su peligrosidad.

A continuación se presenta un resumen de los resultados alcanzados y las correspondientes conclusiones y recomendaciones.

El complejo volcánico El Reventador está constituido por un estrato-cono activo que alcanza una elevación de 3.500 m, ubicado en el interior de un sistema de depresiones múltiples producidas por colapsos volcano-tectónicos y deslizamientos en masa que afectaron a antiguos y más voluminosos aparatos volcánicos.

Los levantamientos de campo han permitido distinguir tres grandes unidades vulcanológicas denominadas:

- Complejo Volcánico Basal (CVB)
- Volcán Paleoreventador (VPR)
- Volcán El Reventador, cono actual (VER)

Tectónica

La evolución estructural del área de El Reventador es muy compleja y está caracterizada por la tectónica compresiva cretácica y terciaria que determinó el desarrollo de cuatro franjas elongadas NNE-SSW, según el eje principal de la Cordillera Real.

El área estudiada, ubicada al este de la zona de los grandes cabalgamientos andinos, está subdividida por el valle del río Coca en dos zonas de deformaciones rígidas y diferente intensidad de fracturamiento.

El complejo volcánico de El Reventador está afectado por múltiples sistemas de tectónica frágil.

El edificio del Complejo Volcánico Basal, fuertemente erosionado, presenta una densa red de fallas conjugadas con dirección NE y NW y, en el sector central, un fallamiento dominante con dirección NNE. Además, está cortado en dirección N-S por un alineamiento de fallas listricas arqueadas, cuyo segmento central corresponde a la superficie de separación de un gigantesco derrumbe que movilizó hacia el este una gran parte del antiguo centro eruptivo.

Con este formidable deslizamiento en masa concluyó el ciclo de actividad del Complejo Volcánico Basal y se produjeron importantes modificaciones paleogeográficas, incluyendo el desplazamiento del cauce del río Coca.

El edificio del Volcán Paleoreventador, que se desarrolló en el interior de un antiguo anfiteatro, presenta una morfología asimétrica, elongada según las directrices tectónicas dominantes (N-S y NE-SW). También este aparato estuvo afectado por una tectónica frágil con algunos indicios de compresión.

La actividad de este aparato terminó hace unos 19.000 años con una gigantesca erupción piroclástica que, probablemente, produjo un colapso caldéico acompañado por un gran deslizamiento del edificio, cuya superficie de desprendimiento estuvo ubicada un poco más al este de la precedente.

El material de la avalancha de escombros relleno completamente una sección del valle del río Coca, originando un embalse natural.

Dentro del nuevo anfiteatro se desarrolló el cono actual del Volcán El Reventador, cuya última erupción se presentó en el año 1976.

El terremoto del 5 de marzo de 1987 reactivó todos los principales sistemas de falla que habían sido previamente identificados en el área de El Reventador, desde las fallas de los cabalgamientos andinos hasta los diferentes sistemas N-S, NNE-SSW, NW-SE que afectan a la misma.

Caracterización petrológica y modelización del sistema eruptivo actual

Aparte de algunos basaltos que presentan una ligera tendencia alcalina sódica por incipiente subsaturación en sílice, en su conjunto los productos de El Reventador indican una clara afinidad calco-alcalina. En general, las variaciones químicas observadas son compatibles con un proceso de diferenciación por cristalización fraccionada, del tipo gábrico, ocurrido en el interior de la corteza a una presión total de unos 7.000 bar.

Las tres secuencias estratigráficas indicadas presentan una sustancial similitud de características químicas y mineralógicas.

Los dos grandes fenómenos de deslizamiento en masa que marcan la finalización de los dos antiguos ciclos eruptivos, corresponden a un estado de madurez de los aparatos caracterizado por erupciones de productos muy evolucionados, de composición riolítica. Una fase similar no ha sido aún alcanzada, ni en forma aproximada, en el volcán actual cuyos productos representan una serie composicionalmente reducida, de basaltos a andesitas.

Estos productos, en función de su edad de emisión, presentan una variación química muy característica. Su grado de evolución disminuyó progresivamente en la fase inicial de edificación del cono actual hasta producir lavas basálticas; posteriormente volvió a aumentar con regularidad hasta los productos más recientes que alcanzan grados de evolución comparables con los de las lavas iniciales.

La reconstrucción de la secuencia eruptiva y el estudio químico y mineralógico detallado de los productos, ha permitido formular un modelo de alimentación del volcán actual que revela la existencia de una cámara magmática superficial ($p_{H_2O} = 1.000$ bar; profundidad = unos 3-5 km) y de volumen reducido (entre pocas decenas y un centenar de millones de metros cúbicos).

Dentro de esta cámara se verifican procesos de cristalización fraccionada y de mezcla por inyección de magma profundo. En el período más reciente este sistema se ha comportado como un sistema cerrado por debajo, sin realimentación, y con una evolución progresiva hacia términos más ácidos sólo por efectos de cristalización fraccionada. Sin embargo, el nivel de evolución que ha alcanzado el sistema permanece todavía bajo (andesitas con SiO_2 alrededor del 58%)

de modo que no permite un nivel elevado de explosividad, el mismo que requeriría un magma con viscosidad y contenido en volátiles mucho más altos.

Evaluación del riesgo volcánico

El modelo elaborado para el estudio del funcionamiento del volcán permite extraer las siguientes conclusiones que son de gran importancia para la evaluación del riesgo volcánico.

— Erupción a esperarse

Una erupción que ocurra en la actualidad o en el futuro próximo debería tener características similares a la última observada en 1976; es decir con un predominio de flujos lávicos y una actividad explosiva muy moderada.

Algunas variaciones hacia una composición más básica con consiguiente emisión de lavas más fluidas y una explosividad inicial más marcada debido a mezclas dentro de la cámara magmática, podrían presentarse en caso que se restablezca la alimentación profunda. De ser así, ésta tendría que estar anunciada por terremotos premonitores profundos e intermedios.

Se considera, en cambio, que no existe ninguna posibilidad de ocurrencia de una gran erupción explosiva similar a la que se ha reconocido como culminación de los dos ciclos de actividad de los aparatos antiguos. En efecto, erupciones de este tipo requieren un grado de evolución del magma (acidez = viscosidad y contenido en gases) mucho más desarrollado del que actualmente ha alcanzado el volcán.

El tiempo requerido para que esto ocurra es difícil de estimar pero es seguramente mucho más largo que la vida útil de las obras de infraestructura existentes o proyectadas.

— Riesgo a esperarse

Tomando en cuenta lo mencionado anteriormente y los resultados de los estudios geológicos y estratigráficos, fueron evaluados los riesgos posibles relacionados con las futuras erupciones del volcán actual, considerando solamente la actividad ocurrida en los últimos 19.000 años.

Se obtuvieron las siguientes conclusiones:

● Coladas de lava

La emisión de coladas de lava representa el tipo de actividad eruptiva predominante.

Las coladas se han mantenido generalmente en el interior del anfiteatro y su longitud varía entre 3 y 6 km. A lo largo de la historia eruptiva del cono actual solamente tres coladas han superado el alto morfológico que constituye el borde oriental del anfiteatro. El frente lávico más alejado alcanzó una distancia de 7 km del cráter y se detuvo a 2-2,5 km de distancia del río Coca.

A la luz de estos datos y de las tendencias evolutivas más recientes obtenidas de la composición de los magmas de El Reventador, se considera improbable que los flujos de lava que emita el cono actual, puedan alcanzar el valle del río Coca.

● Caída de ceniza

La componente explosiva de las últimas erupciones del Volcán El Reventador consiste esencialmente en proyecciones balísticas de bombas y fragmentos lávicos y en la emisión de arena y ceniza a la atmósfera. Los fragmentos más gruesos caen en proximidad del cráter y pueden constituir un riesgo sólo para las personas que estuvieren casualmente presentes en las cercanías del cráter o bien para los instrumentos científicos eventualmente allí instalados.

En cambio, el material fino puede ser transportado por el viento a grandes distancias desde el centro de emisión. Las evidencias geológicas e históricas indican que los materiales piroclásticos de caída, provenientes del cono actual se distribuyen predominantemente al oeste del cráter.

Para modelizar el fenómeno de caída de ceniza, se han asumido las condiciones de altura de la columna eruptiva, tasa de emisión, granulometría, concentración y densidad de las partículas piroclásticas, dirección y velocidad del viento, más próximas a las que, probablemente, existen en El Reventador actual.

Los resultados indican que, aún en el caso más desfavorable, el espesor que alcance sobre el suelo el material piroclástico, a unos 10 km del cráter, no debería causar ningún daño a las obras de infraestructura, aparte de limitados fenómenos de azolvamiento.

Se considera por lo tanto despreciable el riesgo relacionado con caída de material piroclástico.

● Flujos piroclásticos

Algunos fenómenos que podrían interpretarse como debidos al colapso gravitacional de la columna eruptiva, fueron descritos durante la última erupción de 1976. Además, un depósito con las características de un flujo piroclástico fue reconocido dentro del anfiteatro del volcán.

Aunque sean poco probables y de moderada energía, dentro del marco de la actividad ordinaria del volcán, se ha considerado oportuno evaluar el riesgo potencial asociado a estos fenómenos eruptivos.

Por lo tanto se ha procedido a efectuar una simulación numérica de los flujos piroclásticos producidos por el volcán, asumiendo las condiciones de altura de la columna observadas durante la erupción de 1976.

Los resultados demuestran que un flujo piroclástico, originado por el colapso de una columna eruptiva, alcanzaría los sitios de las infraestructuras existentes y proyectadas, solamente si se verificara una erupción explosiva con una energía mucho mayor de las que han caracterizado a toda la actividad de El Reventador actual. En efecto, ningún depósito de flujo piroclástico producido por el cono actual ha sido observado fuera del anfiteatro y, consecuentemente, se considera despreciable el riesgo debido a estos fenómenos.

Pese a no tener implicaciones para la evaluación del riesgo volcánico del cono actual, se debe recordar que un evento eruptivo gigantesco, con sus relativos depósitos de flujo piroclástico cerró la actividad del Volcán Paleoreventador.

● Explosiones freáticas

Este fenómeno es relativamente frecuente en las cercanías del cráter actual, en donde pueden ocurrir explosiones de energía muy baja, debido a la acumulación de los fluidos fumarólicos por debajo de una delgada capa impermeabilizada por fenómenos de autosellamiento. Estos fenómenos podrían representar un peligro solamente para los técnicos y científicos que tengan que trabajar cerca del cráter.

● Flujos de lodo o lahares

En el curso de los trabajos de campo no se ha encontrado ninguna evidencia de que lahares de origen volcánico, es decir, lahares producidos durante una erupción, por fenómenos freatomagmáticos o por movilización de las nubes piroclásticas sueltas emitidas, hayan alcanzado el río Coca durante toda la historia eruptiva de El Reventador actual.

Sin embargo, los flujos de lodo pueden originarse sin ninguna causa volcánica, debido a la movilización de materiales inestables saturados en agua. En efecto, estos fenómenos son relativamente frecuentes bajo las condiciones tectónicas e hidrológicas que provocan inestabilidad de los taludes naturales del edificio del volcán.

Flujos de este tipo pueden ocurrir como consecuencia de violentas lluvias y luego de un evento sísmico muy fuerte.

El terremoto del 5 de marzo de 1987 provocó fenómenos de movilización de materiales a lo largo de los ríos principales, cuya repetición en el futuro representaría un peligro para las infraestructuras y para las personas y bienes que se encuentran a lo largo de los ríos y quebradas.

Conclusiones y recomendaciones

Las investigaciones de campo y de laboratorio han permitido efectuar una reconstrucción detallada de la historia eruptiva, de la estructura y de la evolución magmática del complejo volcánico El Reventador.

Estos datos han sido utilizados para definir un modelo de funcionamiento del volcán que, a su vez, ha sido el sustento indispensable para la evaluación del riesgo relacionado con su actividad eruptiva.

En base a la reconstrucción de todos los fenómenos eruptivos que ocurrieron en los últimos 19.000 años, correspondientes a la vida del cono actual, y a la simulación computarizada de algunos fenómenos eruptivos, se ha podido llegar a las siguientes conclusiones:

- Es improbable que fenómenos eruptivos relacionados con el volcán El Reventador, flujos de lava y de piroclastos, caída de ceniza y lahares de origen volcánico, puedan afectar en forma drástica a las obras existentes o previstas en el marco de los proyectos hidroeléctricos en estudio. Por lo tanto, y en conjunto, el riesgo volcánico puede ser considerado despreciable.
- Los fenómenos de flujos de lodo o, más ampliamente la movilización de materiales inestables saturados de agua desde las laderas del edificio volcánico, debido a fuertes eventos sísmicos y/o violentas lluvias como los que ocurrieron el 5 de marzo de 1987, representan un potencial peligro para las estructuras al exterior. El terremoto del 5 de marzo de 1987 puede representar el evento máximo de referencia para la evaluación del impacto que podrían tener estos fenómenos sobre las obras existentes o proyectadas.
- Los resultados del estudio geoquímico preliminar de las fumarolas cratéricas y de algunas fuentes termales de la zona de El Reventador han permitido seleccionar algunos puntos que pueden ser convenientemente utilizados para el futuro monitoreo del volcán.

Las actividades posteriores que se recomienda llevar adelante en una etapa sucesiva de estudio del volcán serían las siguientes:

- Revisión del programa para el monitoreo del volcán, a la luz de los resultados que se obtendrán de la red microsísmica que será implantada en el área.
- Continuación del muestreo periódico y análisis de fumarolas y fuentes termales.
- Diseño final del sistema de monitoreo del volcán, su instalación y puesta en marcha.
- Elaboración de planes de funcionamiento del centro de control del sistema de monitoreo y definición de planes de emergencia en el caso de una erupción, que estén basados sobre escenarios realísticos.

A pesar del impacto relativo que la reanudación de la actividad de un volcán puede representar sobre las obras de infraestructura, una erupción constituye un evento de alta dramática y espectacularidad que llama la atención de todos los medios de comunicación.

Además, en el caso del volcán El Reventador, ésta ocurriría en una zona de gran importancia para la economía del país. Por lo tanto, no sería admisible que no existiera un sistema técnico de vigilancia que permita evaluar los fenómenos eruptivos, su duración e importancia.

BIBLIOGRAFIA

- ALMEIDA E., CRUZ M. (1986). Estudio geológico del Volcán El Reventador. INECEL, pp. 43.
- ARCULUS R. J., WILLS K. (1980). The petrology of plutonic blocks and inclusions from the Lesser Antilles Island Arcs. *J. Petrol.*, 21, 743-799.
- ARMIENTI P., PARESCI M. T. (1987). Automatic reconstruction of surge deposit thicknesses. Applications to some italian volcanoes. *Jour. Volc. and Geoth. Res.*, 31, 313-320.
- ARMIENTI P., MACEDONIO G., PARESCI M. T. (1987). A numerical model for the simulation of tephra transport and deposition: applications to the May 18, 1980 Mt. St. Helens eruption in press on the *Jor. of Geoph. Res.*
- BAKER D. R., EGGLER D. H. (1983). Fractionation path of Atka (Aleutians) High-alumina basalts: constraints from phase relations. *J. Volcanol and Geoth. Res.*, 387-404.
- BALDOCK J. W. (1982). Geology of Ecuador. Explanatory Bulletin of the National Geological Map of the Republic of Ecuador.
- BARBERI F., COLTELLI M., FERRARA G., INNOCENTI F., NAVARRO J. M., SANTACROCE R. (1987). Plio-Quaternary volcanism in Ecuador. *Geol. Mag.*
- BOTTINGA Y., WEILL D., RICHET P. (1982). Density calculations for silicate liquids. I. Revised method for aluminosilicate compositions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46, 909-919.
- BURNAM C. W., DAVIS N. F. (1974). The role of H₂O in silicate melts, II. Thermodynamics and phase relations in the system Ab-H₂O to 10 kb, 700 to 1.100 C. *Am. Jour. of Sci.*, 274, 902-940.
- CONRAD W. K. (1987). A FORTRAN program for simulating major and trace element variations during Rayleigh fractionation with melt replenishment or assimilation. *Comp. & Geosci.*, 13, 1-12.
- DE PAOLO D. J. (1981). Trace-element and isotope effects of combined wallrocks assimilation and fractional crystallization. *E. P. S. L.*, 53, 189-202.

- DICKINSON W. R. (1976). Sedimentary basins developed during evolution of mesozoic-cenozoic arc-trench system in western North America, *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 13, p. 1268-1287.
- FAUCHER B., SAVOYAT E. (1973). Esquisse géologique des Andes de l'Ecuador. *Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique* 15, 115-42.
- GHIORSO M. S., CARMICHAEL I.S.E., RIVERS M. L., SCAK R. O. (1983). The Gibbs free energy of mixing of natural silicate liquids; an expanded regular solution approximation for the calculation of magmatic intensive variables. *Contrib. Mineral. Petrol.* 84, 107-145. Green in Andesites.
- GREEN T. H. (1982). Anatexis of mafic rocks and high pressure crystallization of andesites. In "Andesites" R. S. Thorpe Edt., 465-488, J. Wiley & Sons Ltd.
- HALL M. L. (1977). El Volcanismo en el Ecuador. *Biblioteca Ecuador Inst. Pan. Geog. Hist.*, pp 120.
- HALL M. L. (1980). El Reventador, Ecuador, un volcán activo de los Andes Septentrionales. *Polit. Monog. Geol.* 5-2, 123-136.
- HANTKE G., PARODI A. (1966). Catalogue of the active volcanoes of the world. Part XIX (Colombia, Ecuador y Perú); *Ing. Ass. Volc. Chem. Earth's Interior*; Rome, Italy.
- HERZBERG C. T. (1978). Pyroxene geothermometry and geobarometry: experimental and thermodynamic evaluation of some subsolidus phase relations involving pyroxenes in the system CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ *Geochim. Cosmochim. Acta*, 42, 945-957.
- INECEL (1984). Estudio de actualización del informe hidrológico del Proyecto Coca. Quito.
- INECEL (1983). Informe Geológico Proyecto Coca-Codo Sinclair. Quito.
- INECEL (1977). Informe de Prefactibilidad del Proyecto Hidroeléctrico Coca. Quito.
- IRVINE T. W., BARAGAR W. R. A. (1972). A guide to chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. J. of Earth Sci.*, 8, 523-548.
- KEEFER D. K. (1984). Rock avalanches caused by earthquakes: source characteristics. *Science*, 223, 1288-1290.
- KUDO A. M., WEILL D. F. (1970). An igneous plagioclase thermometer. *Contrib. Mineral. Petrol.* 25, 52-65.
- LARA O., CHAVEZ M. A. (1987). Los sismos de marzo de 1987, causas, efectos y proyecciones de la catástrofe. *ESPOL Guayaquil, Ecuador*, pp. 21.
- LEEMAN W. P., SCHEIDGGER K. F. (1977). Olivine liquid distribution coefficients and a test for crystal-liquid equilibrium. *EPSL*, 35, 247-257.
- LINDSLEY D. K. (1983). Pyroxene Thermometry. *Amer. Mineral.*, 68, 477-493.
- LONSDALE P. (1978). Ecuadorian subduction system. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 62, 2454-77.
- LONSDALE P., KLITGORD K. D. (1978). Structure and tectonic history of the Eastern Panama Basin. *Bull. Geol. Soc. of Am.*, Vol. 89, pp. 981-999.
- MACEDONIO G., PARESCHI M. T., SANTACROCE R. (1987). Valutazione e controllo di alcuni parametri fisici agenti durante la fase pliniana dell'eruzione del Vesuvio del 79 D.C. *Bollettino del GNV*, 1987 MCBIRNEY R. & MURASE T. (1984). Rheological properties of magmas. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 12, 337-357.
- NEWELL R. E., KIDSON J. W., VINCENT D. G., BOER G. J. (1972). The general circulation of the tropical atmosphere and interactions with extratropical latitudes, 1 pp. 258. MIT press, Cambridge.
- NICHOLLS J. (1980). A simply thermodynamic model for estimating the solubility of H₂O in magmas. *Contr. Mineral. Petrol.* 74, 211-220.

- PAZ Y MIÑO L., GUERRERO J., BONIFAZ C. (1931). La exploración A. J. Reventador; Ministerio de Educación Pública, Quito.
- PENNINGTON W. D. (1981). Subduction of the Eastern Panama Basin and sismotectonics of Northwestern South America. *Journal of Geophysical Research* 86, 10753-70.
- PICHLER M., HORMANN P. K., BRAUN A. F. (1976). First petrologic data on lavas of the Volcano El Reventador (Eastern Ecuador). *Münster. Forsch. Geol. Palont. M.* 38/39; S. 129-141; Münster (Westfalia), sep. 1976.
- PILGER R. H. Jr. (1984). Cenozoic plate kinematics, subduction and magmatism: South America Andes. *J. of the Geol. Soc. London*, 141, 793-802.
- RAMSAY J., HUBER M. (1987). The techniques of modern structural geology. Vol. II. Folds and Fractures. London, Pergamon Press.
- ROEDER P. L. (1974). Activity of iron and olivine solubility in basaltic melts. *E. P. S. L.*, 23, 397-410.
- ROPERCH P., MEGARD F., LAJ C., MOURIER T., CLUBE T. M., NOBLET C. (1987). Rotated oceanic blocks in Western Ecuador. *Goph. Res. Let. Vol. 14 N° 5*, pp. 558-561, May 1987.
- SHERIDAN M. F. (1980). Pyroclastic block flow from the september 1976 eruption of La soufriere volcano. Guadeloupe. *Bull. Volcanol.*, 43, 397-402.
- SPARKS R. S. J., WILSON J., HULME G. (1978). Theoretical modeling of the generation, movement and emplacement of pyroclastic flows by column collapse. *J. Geoph. Res.*, 83, 1727-1739.
- STORMER J. C. Jr (1983). The effects of recalculations on estimates of T and FO₂ from analyses of multicomponent iron-titanium oxides. *Amer. Min.* 68, pp. 586-594.
- STORMER AND NICHOLLS J. (1978). XLFRAC: a program for the interactive test of magmatic differentiation models. *Computer & Geosci.* 4, 153-159.
- SUAREZ G., MOLNAR P., BURCHFIEL B. C. (1983). Seismicity and active tectonics of the Andes of Perú, Ecuador, and Southern Colombia. *Journal Geophys. Res.*, Vol. 88, N° B12, pp. 10403-10428.
- UNESCO (1971). The surveillance and prediction of volcanic activity, Earth Sciences, 8, UNESCO, París, 166 p.
- WELLS P. R. A. (1977). Pyroxene thermometry in simple and complex system. *Contib. Mineral. Petrol.* 62, 129-139.
- WILSON L., SPARKS R. S. J., WALDER G. P. L. (1980). Explosive volcanic eruptions-IV. The control of magma chamber and conduit geometry on eruption column behaviour. *Geophys J. R. Astr. Soc.* 63, 117-148.

14

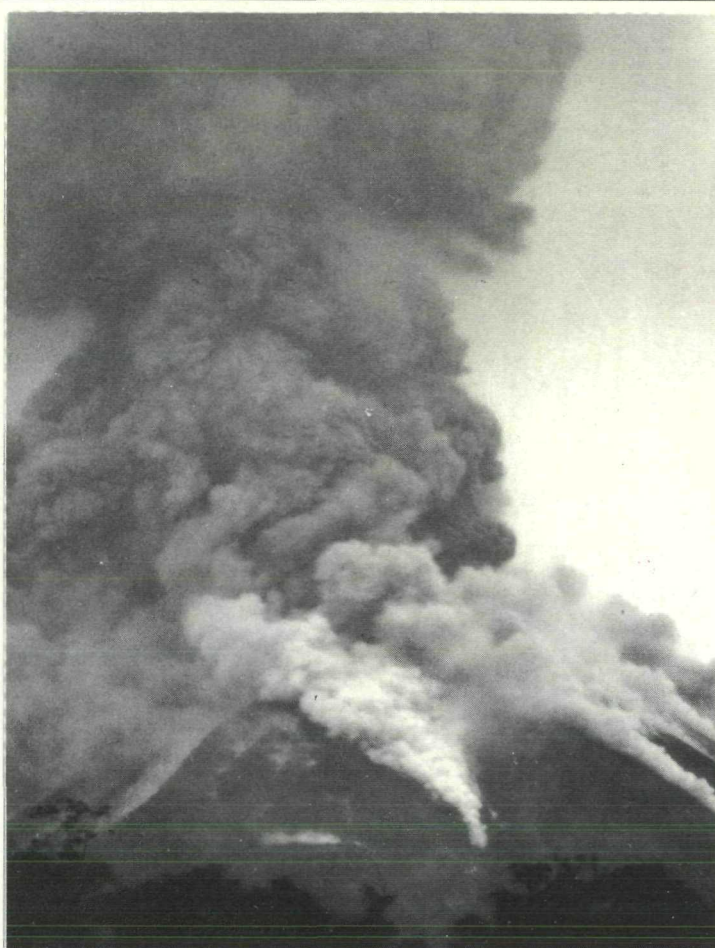
DOCUMENTACION

FOTOGRAFICA



FOTOS N° 1 y 2.- VOLCAN EL REVENTADOR (VER)

Vista del anfiteatro y detalle del edificio del volcán durante la erupción del año 1976. C. Hirst 1976.



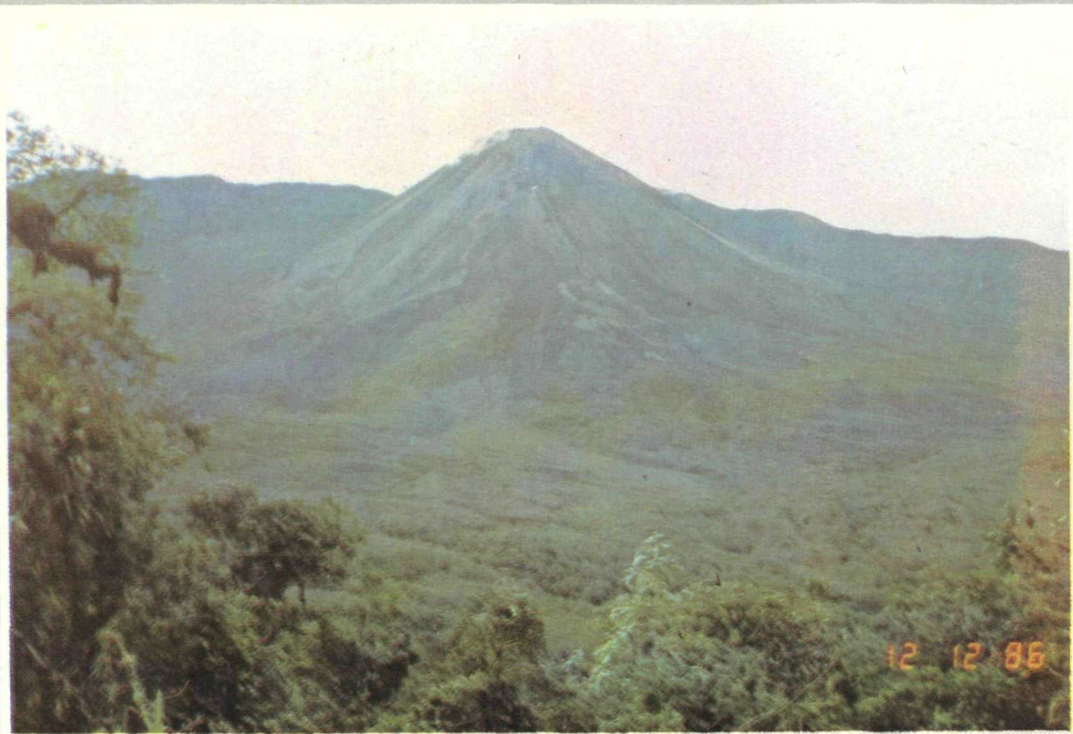


FOTO N° 3.- VOLCAN EL REVENTADOR (VER). EL ANFITEATRO

Se evidencia el edificio del Volcán El Reventador, resaltando los diferentes flujos de lava. W. Balseca 1986.



FOTO N° 4.- VOLCAN EL REVENTADOR (VER)

Vista general del cráter actual, en él se define la migración del centro eruptivo anterior hasta el actual y la disposición de los diferentes flujos de lavas históricas y materiales piroclásticos, flanco NE, S y E, respectivamente. J. Salvador 1980.



FOTO N° 5.- VOLCAN EL REVENTADOR (VER)

Cráter del Volcán El Reventador, grietas superficiales desarrolladas como consecuencia del sismo del 5 de marzo de 1987, flanco N. P. López 1987.

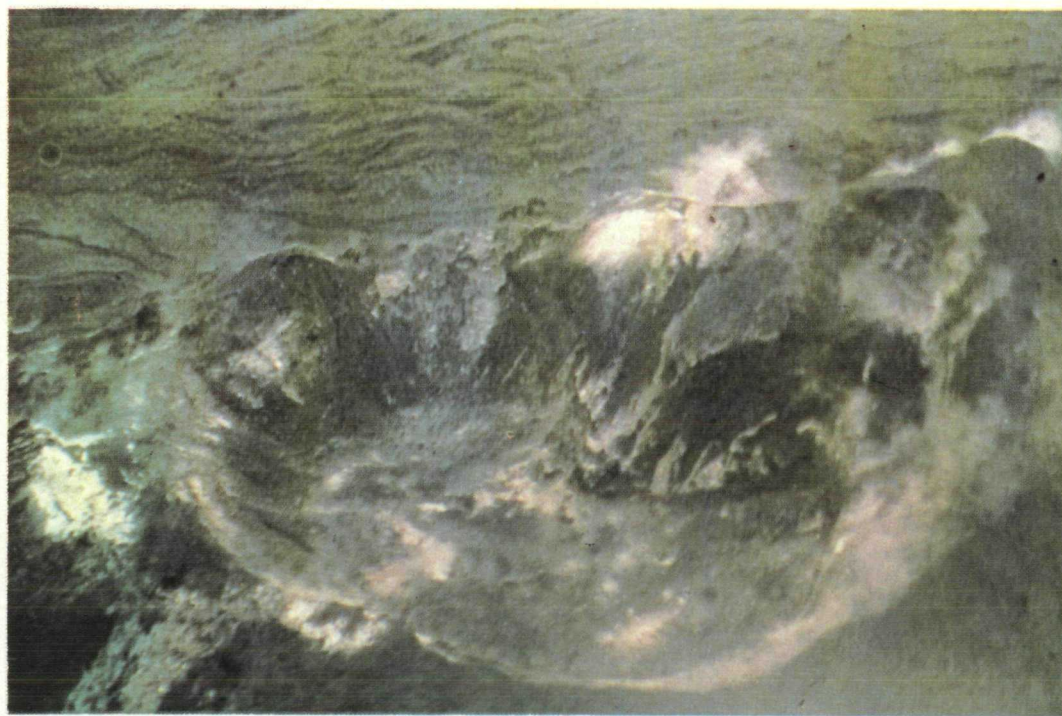
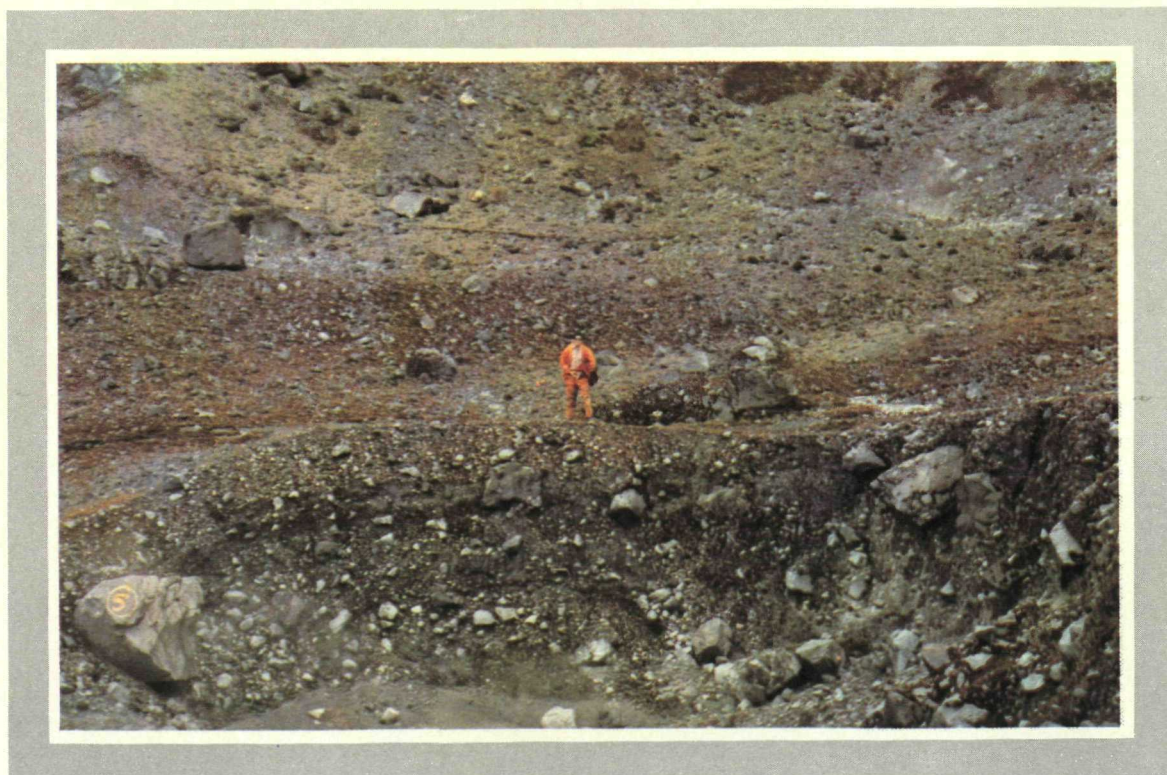
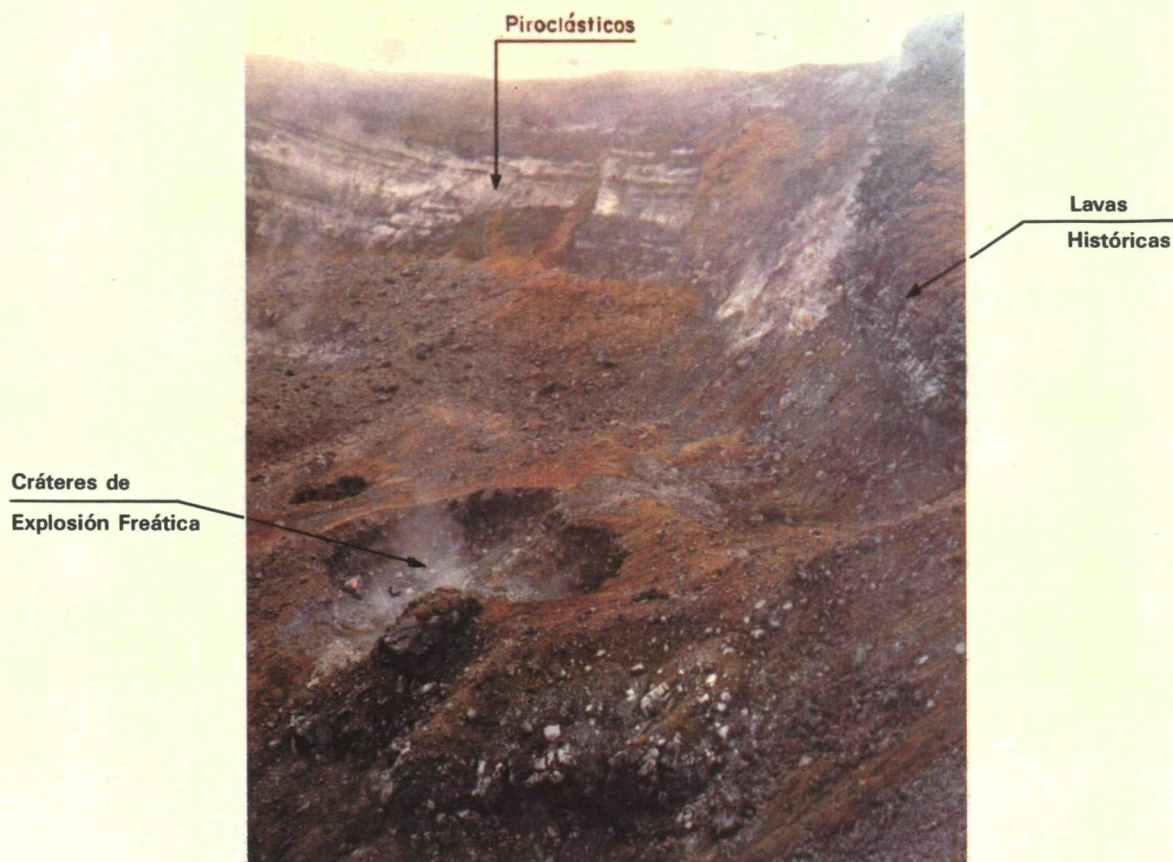


FOTO N° 6.- VOLCAN EL REVENTADOR (VER)

Cráter del Volcán El Reventador, en el interior se observa el centro eruptivo anterior hasta el actual. J. Salvador 1980.



FOTOS N° 7 y 8.- VOLCAN EL REVENTADOR (VER)

Detalles de las fumarolas al interior del cráter y distribución de los materiales piroclásticos, lavas históricas y cráteres de explosión freática. M. Ferraris 1987.



FOTO N° 9.- QUEBRADA LA ESPANTOSA

Alternancia de flujos de lavas, lahares, aglomerados volcánicos y piroclásticos, pertenecientes al Complejo Volcánico Basal (CVB). W. Balseca 1987.

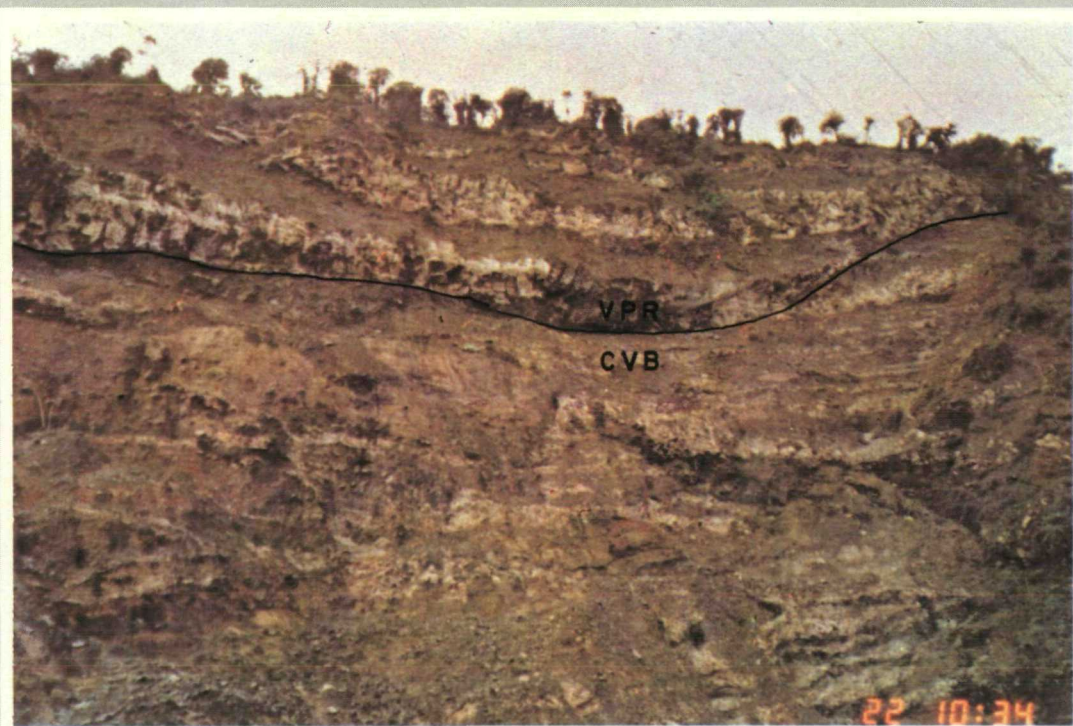


FOTO N° 10.- PARED SUR DEL ANFITEATRO

Alternancia de flujos de lava, lahares y aglomerados volcánicos. Se evidencia los edificios volcánicos (CVB) y (VPR). W. Balseca 1987.



FOTO N° 11.- RIO DUE GRANDE

Rocas mesozoicas dinamometamórficas, pliegues volcados en uno de los frentes de cabalgamiento, fallamiento y fracturamiento intenso y corrimiento de los horizontes rígidos. W. Balseca 1987.

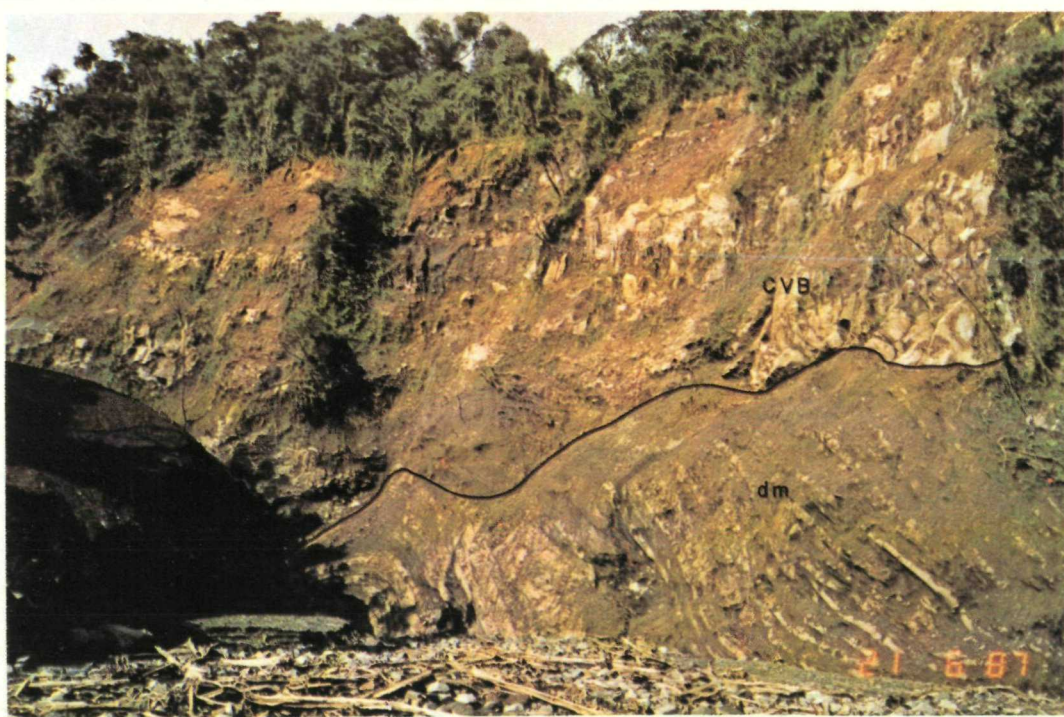


FOTO N° 12.- RIO LAS DANTAS

Rocas mesozoicas dinamometamórficas, el cabalgamiento ha ocasionado en la zona un fuerte plegamiento y fallamiento, cubriendo el basamento aparece una alternancia de flujos de lava y lahares. W. Balseca 1987.



FOTO N° 13.- RIO MALO (PROXIMO A LA FALLA SALADO-MALO-VOLCAN EL REVENTADOR)

Fallamiento tipo compresional de bajo ángulo, es evidente en el paquete sedimentario mesozoico (formación Hollín). W. Balseca 1987.



FOTO N° 14.- RIO AGUA CLARA

Rocas metamórficas de la Cordillera Real, falla transcurrente dextral de carácter regional, rumbo NE. W. Balseca 1987.



FOTO N° 15.- PARED NOROCCIDENTAL DEL ANFITEATRO

Contacto entre los flujos de lava y aglomerados volcánicos del Complejo Volcánico Basal (CVB) y los productos volcánicos del Volcán Paleoreventador (VPR). W. Balseca 1987.



FOTO N° 16.- PARED SUR DEL ANFITEATRO

Presencia de los dos edificios volcánicos, Complejo Volcánico Basal (CVB) y Volcán Paleoreventador (VPR). W. Balseca 1987.



FOTO N° 17.- RIO LAS DANTAS
Complejo Volcánico Basal (CVB). Alternancia de capas de lahares,
piroclastos y depósitos de surge. W. Balseca 1987.

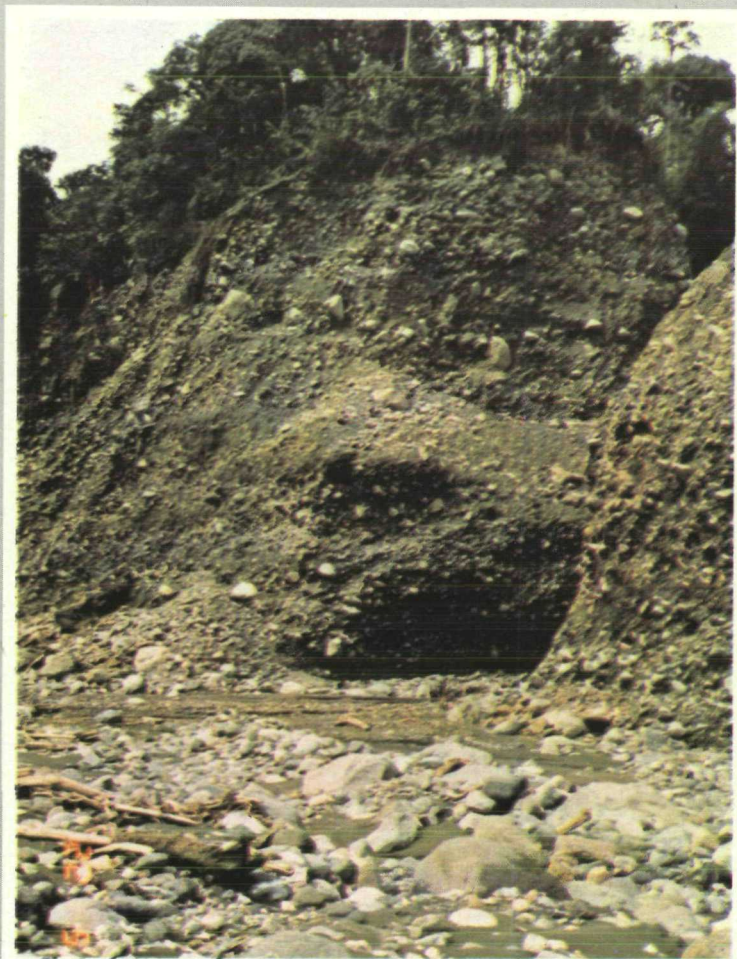


FOTO N° 18.- RIO DUE GRANDE
Potentes depósitos de lahares
atribuidos al Paleoreventador (VPR).
W. Balseca 1987.

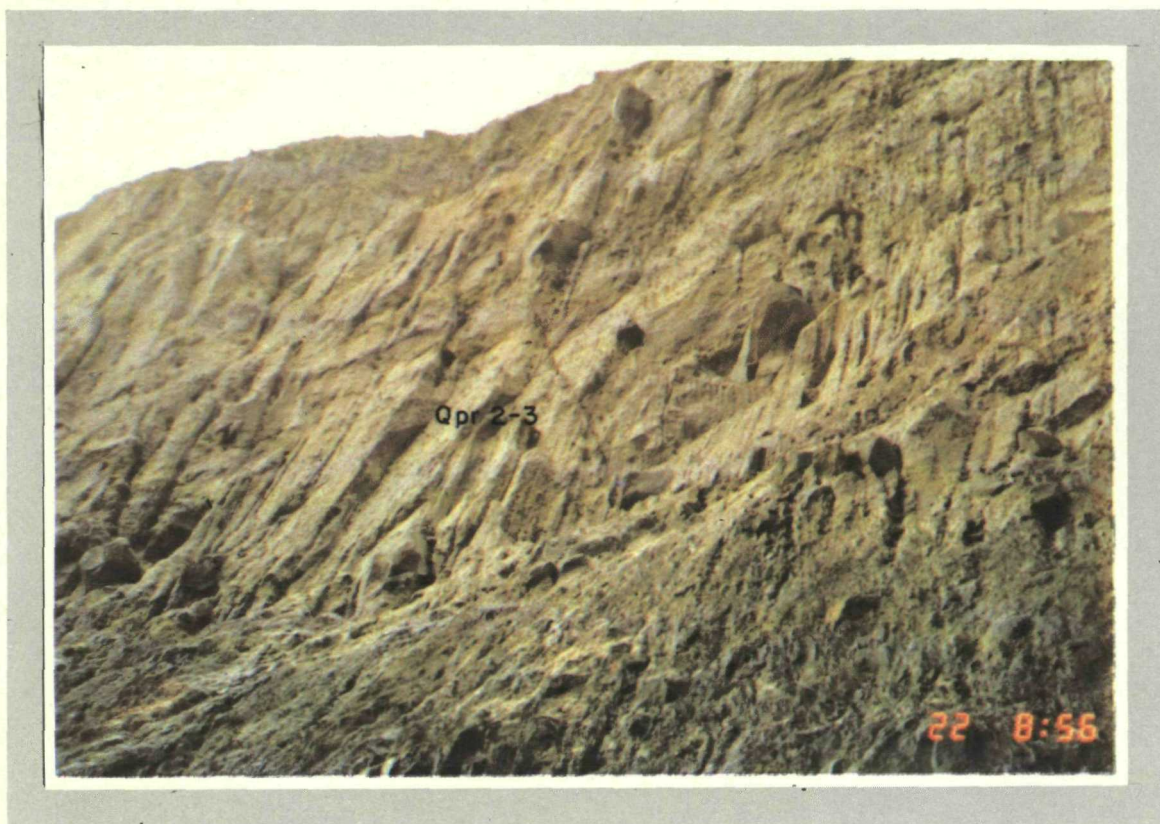


FOTO N° 19.- PARED SUR DEL ANFITEATRO

Potentes flujos piroclásticos y depósitos de caída (Qpr2-3) cubren el plano de deslizamiento dejado luego de la segunda avalancha de escombros (debris flow). W. Balseca 1987.

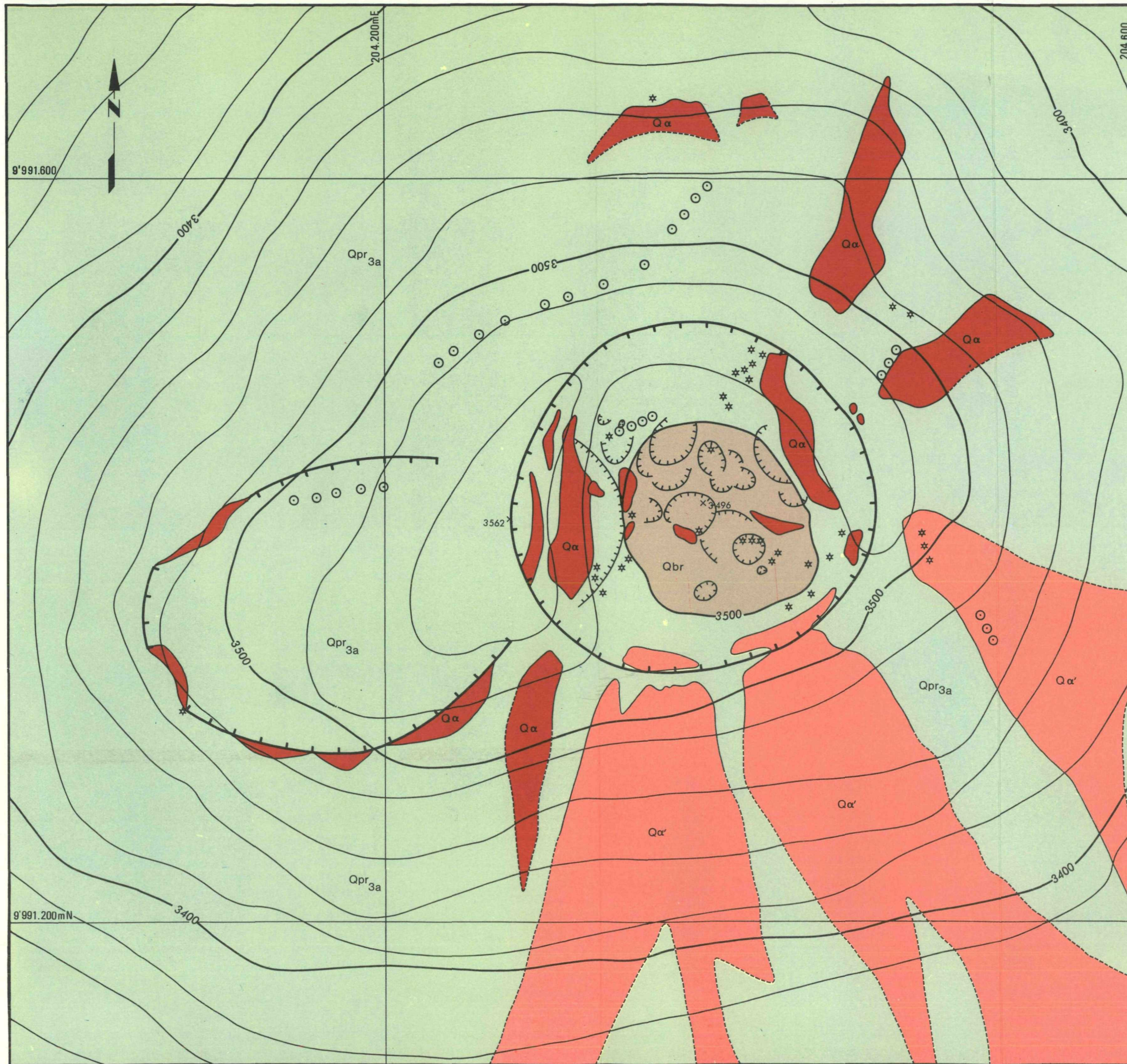


FOTO N° 20.- CABECERA DEL RIO ENGAÑO

Detalle de los depósitos de avalancha de escombros. Se evidencia relictos de coladas de lava en una masa caótica constituida básicamente por piroclastos. M. Ferraris 1986.

15

PLANOS



- Qbr BRECHAS DE EXPLOSIÓN
- Qpr_{3a} MATERIALES PIROCLÁSTICOS DE CAÍDA ("FALL")
- Qα' LAVAS HISTÓRICAS COLADAS DE 1972-74 y 1976
- Qα LAVAS RECIENTES
- CONTACTO OBSERVADO
- CONTACTO INFERIDO
- BORDE DEL CRÁTER
- BORDE DE LOS CRÁTERES DE EXPLOSIÓN FREÁTICA
- * * * EMANACIONES GASEOSAS INTENSAS, DE ALTA TEMPERATURA
- ○ ○ EMANACIONES GASEOSAS ALINEADAS

40 20 0 10 20 30 40m
ESCALA 1:2.000



MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS

INSTITUTO ECUATORIANO DE
ELECTRIFICACIÓN

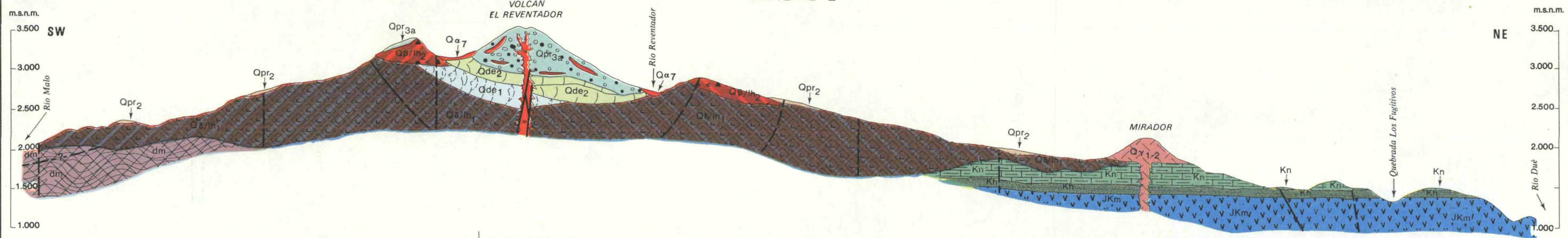
ESTUDIO VULCANOLÓGICO DE "EL REVENTADOR" MAPA GEOLÓGICO DEL CRÁTER

ESTUDIOS REALIZADOS POR INECEL Y LA ASOCIACIÓN DE FIRMAS
CONSULTORAS DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO
COCA-CODO SINCLAIR

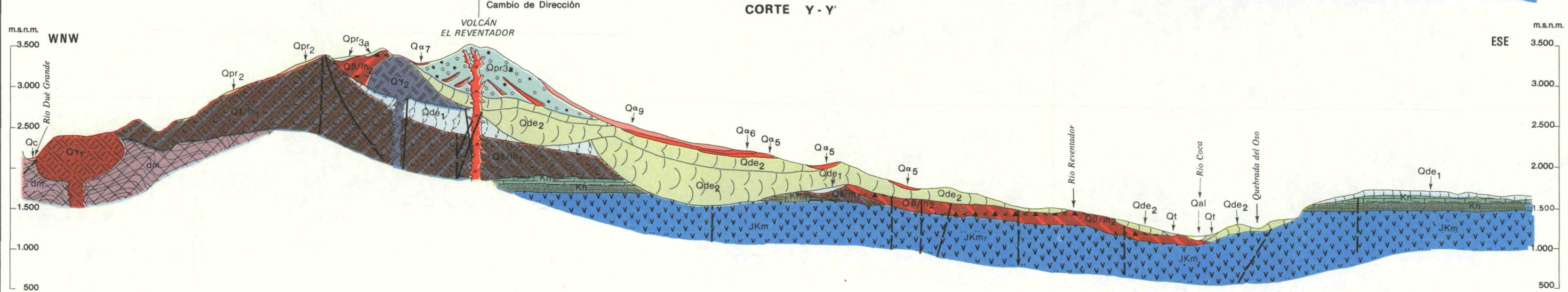
FINANCIAMIENTO: INECEL - BID - FONAPRE

1988

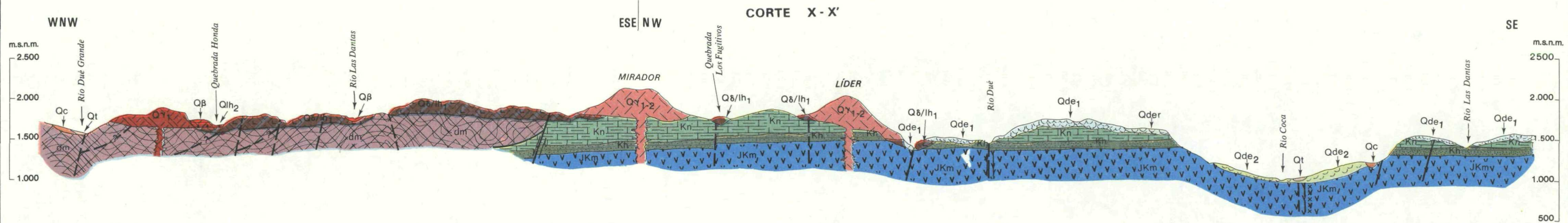
CORTE Z-Z'



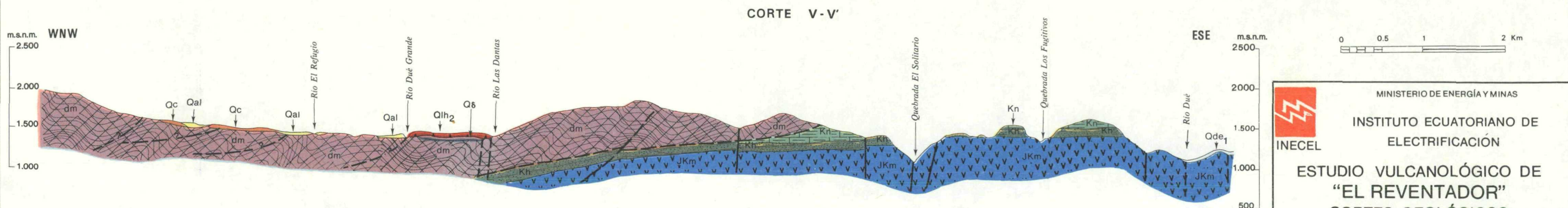
CORTE Y-Y'



CORTE X-X'



CORTE V-V'



0 0.5 1 2 Km



MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS

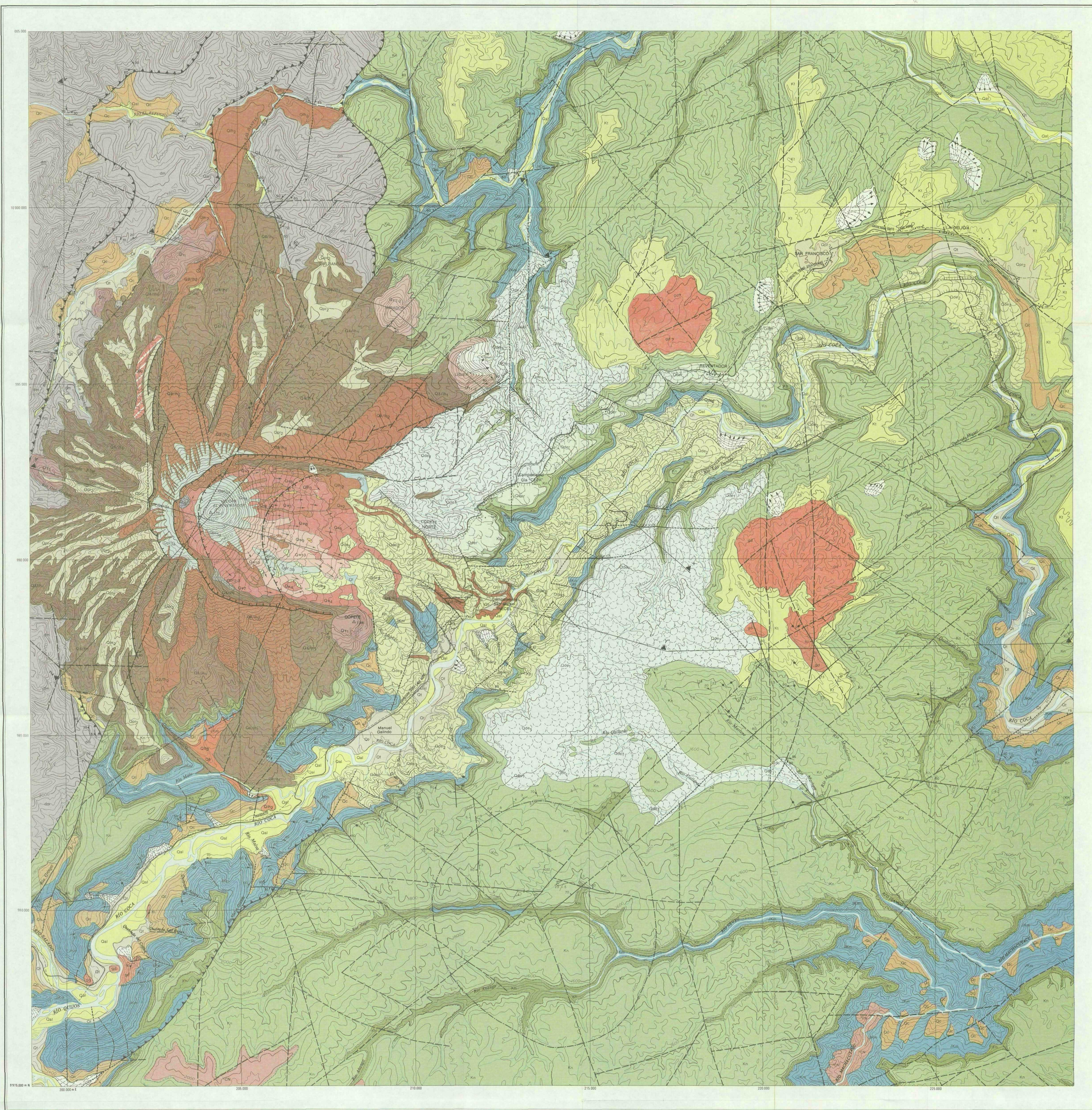
INSTITUTO ECUATORIANO DE
ELECTRIFICACIÓN

ESTUDIO VULCANOLÓGICO DE "EL REVENTADOR" CORTES GEOLÓGICOS

ESTUDIOS REALIZADOS POR INECEL Y LA ASOCIACIÓN DE FIRMAS
CONSULTORAS DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO
COCA - CODO SINCLAIR

FINANCIAMIENTO: INECEL - BID - FONAPRE
1988

VOLCÁN EL REVENTADOR



MATERIALES SUELTOS ROCAS SEDIMENTARIAS, IGNEAS Y METAMÓRFICAS

- Qc Depósitos coluviales
- Qal Depósitos aluviales actuales y recientes
- Qf Depósitos fluvio-lacustres
- Qr Terrazas aluviales antiguas

LEYENDA

ROCAS VOLCÁNICAS

- Qh₁ Lahares y aglomerados volcánicos
- Qh₂ Materiales proclásticos de caída y depósitos de flujo proclástico
- Qh₃ Lavas históricas Coladas Qh₃ (1976) y Qh₃ (1972-74)
- Qh₄ Lavas recientes Coladas Qh₄ n.º 1 (pre-1972 y post-derumbes)
- Qh₅ Depósitos de caída y de flujo proclástico
- Qh₆ Depósitos de avalancha de escombros
- Qh₇ Materiales proclásticos de caída
- Qh₈ Centro de emisión berférico (Quebrada Honda)
- Qh₉ Alternancia de lavas, lahares y aglomerados volcánicos
- Qh₁₀ Domo Ouchilla
- Qh₁₁ Domo Mirador y Líder
- Qh₁₂ Depósitos retrabajados de avalancha de escombros
- Qh₁₃ Depósitos de avalancha de escombros
- Qh₁₄ Domo del Río Dué Grande y El Copete
- Qh₁₅ Alternancia de lavas y lahares, aglomerados volcánicos y proclásticos
- Qh₁₆ Productos sin diferenciar del Volcán Cerro Negro

dm Rocas mesozoicas dinamometamórficas

gd Cuerpos intrusivos granodioríticos

kl Lutitas y margas

ka Lutitas, calizas, areniscas

kn Areniscas

pr Lavas, proclásticas

SÍMBOLOS GEOLÓGICOS

- Contacto
- - - Contacto interio
- - - Bloque levantado
- - - Bloque hundido
- - - Falla inversa
- - - Falla cubierta
- - - Falla inferida o lineamiento foto-geológico
- - - Superficie de desprendimiento de lavas
- - - Traza de un cuerpo plutónico no aflorante
- ↗ Estratificación inclinada, vertical
- ↘ Foliación inclinada
- ↗ Fractura inclinada, vertical
- ↘ Plegue volcado
- × × × × × Zona de brecha
- Escarpa erosional y de deslizamiento
- Deslizamiento antiguo
- Cono de deyección

ESQUEMA ESTRUCTURAL

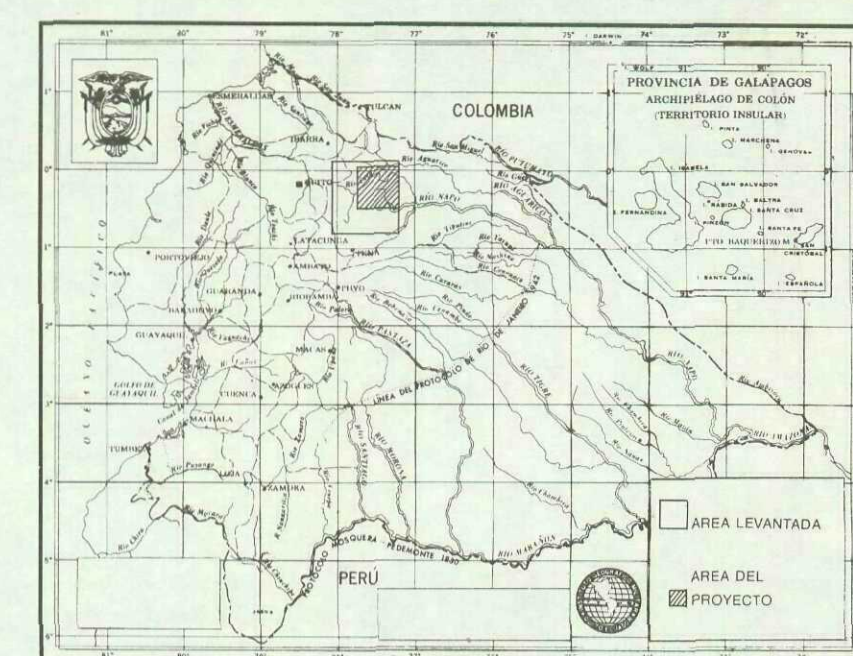
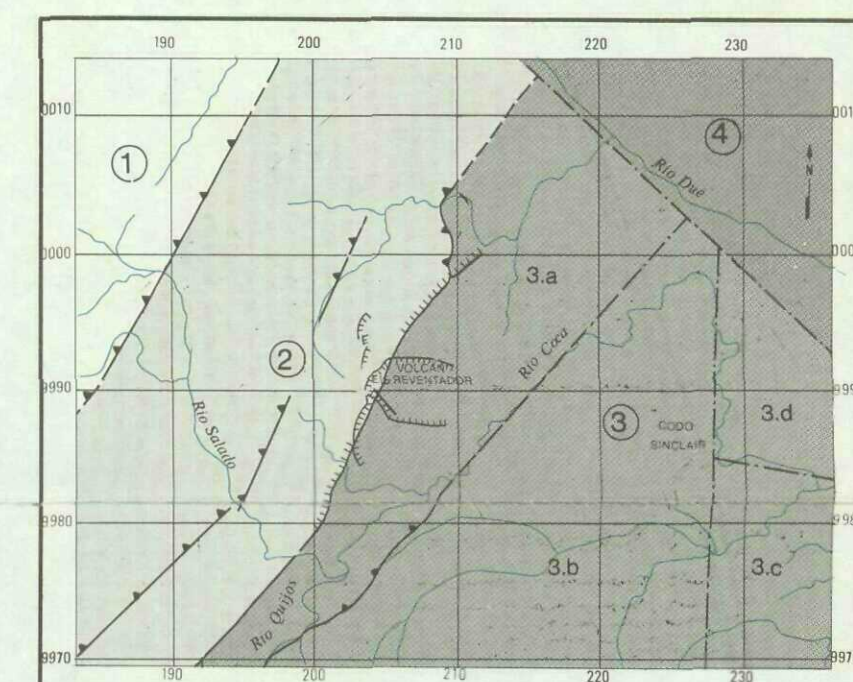
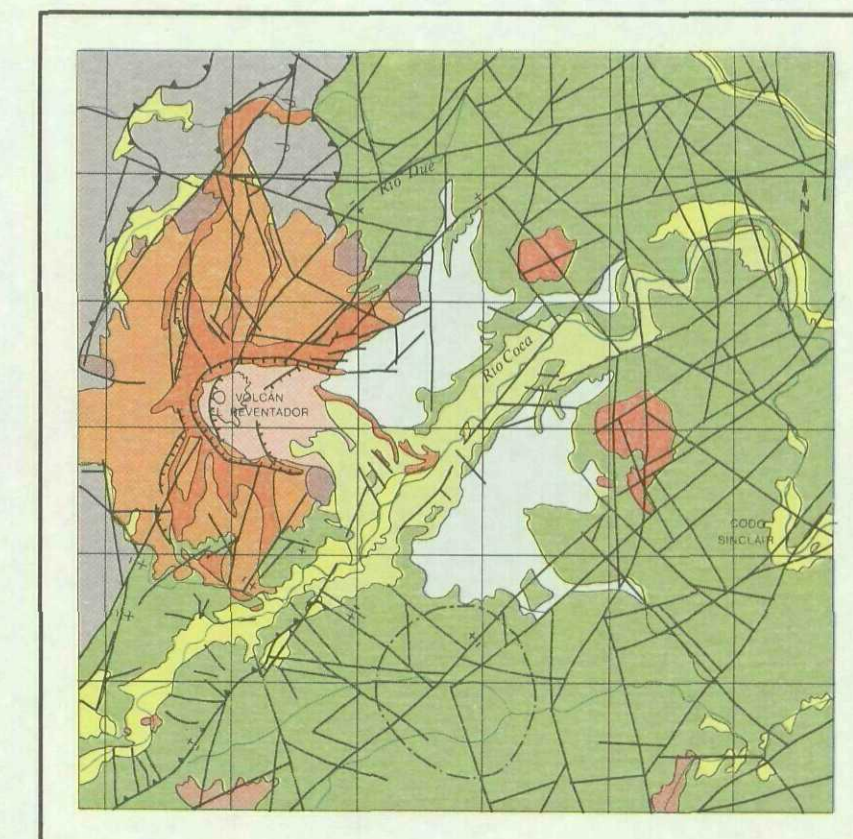
ESCALA 1:300.000

- Materiales sueltos recientes
- Unidad del Volcán El Reventador (VER)
- Avalancha de escombros del Volcán Paleoreventador
- Unidad del Volcán Paleoreventador (VPR)
- Avalancha de escombros del Complejo Volcánico Basal
- Domo
- Unidad del Complejo Volcánico Basal (CVB)
- Unidad del Volcán Cerro Negro
- Rocas mesozoicas dinamometamórficas
- Cuerpos intrusivos
- Basamento mesozoico

ZONACIÓN ESTRUCTURAL

ESCALA 1:300.000

- 1 Zona de los cabalgamientos
- 2 Zona de escamas
- 3 Zona con deformaciones frías
- 3.a Subzona El Reventador
- 3.b Subzona Río Coca
- 3.c Subzona Codo Sinclair S.E.
- 3.d Subzona Codo Sinclair N.E.
- 4 Zona de plegues



SEPARACIÓN DE COLORES E IMPRESIÓN EN EL INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR - JUNIO DE 1988

ÍNDICE DE HOJAS TOPOGRÁFICAS DEL I.G.M.

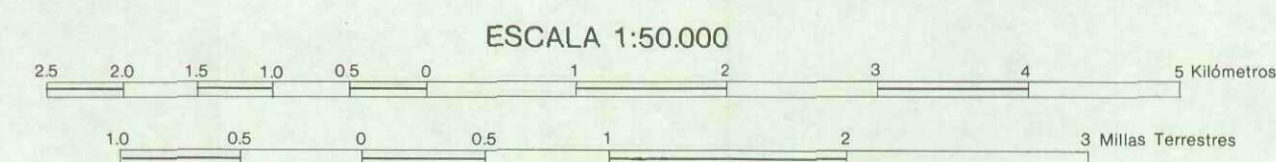
ESCALA 1:50.000

| | | |
|----------------------|----------------------|----------------|
| Qh-E3 | Qh-E4 | Qh-F3 |
| RIO DUE GRANDE | RIO DUE GRANDE | LUMBAQUE |
| Qh-A1 | Qh-A2 | Qh-B1 |
| VOLCÁN EL REVENTADOR | VOLCÁN EL REVENTADOR | ATENAS |
| Qh-A3 | Qh-B2 | Qh-B3 |
| LAS PALMAS | RIO PAISHIVACU | RIO PAISHIVACU |

MOSAICO ELABORADO POR INECEL A ESCALA 1:25.000

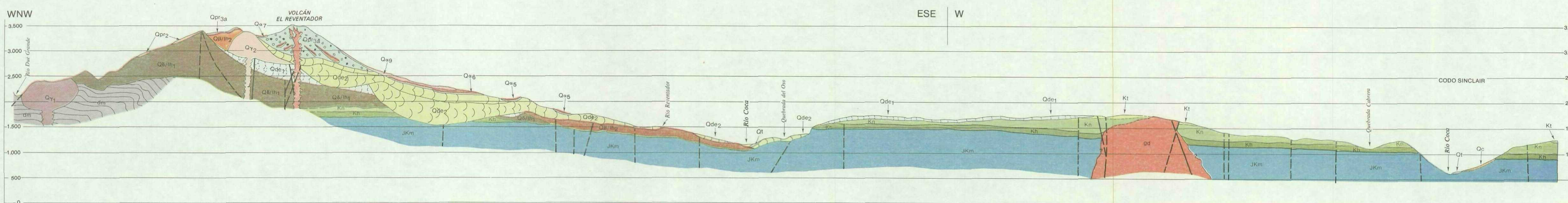
EN BASE A HOJAS TOPOGRÁFICAS DEL I.G.M.

| | | |
|-----------------|----------------------|-----------------|
| ALTO RIO SALADO | RIO DUE GRANDE | RIO DUE CHICO |
| RIO SALADO | VOLCÁN EL REVENTADOR | CODO SINCLAIR |
| LAS PALMAS | RIO QUICOR - COCA | RIO MACHACUYACU |



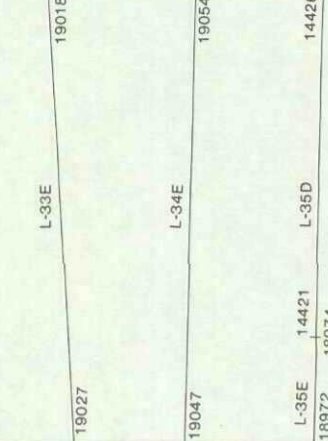
PERFIL GEOLÓGICO A LO LARGO DE LA LÍNEA Y-Y'

ESCALAS
HORIZONTAL 1:50.000
VERTICAL 1:50.000



ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS

(1977-1983)



ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS

(1987)



MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS

INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACIÓN

MAPA GEOLÓGICO DEL VOLCÁN EL REVENTADOR

ESTUDIOS REALIZADOS POR INECEL Y LA ASOCIACIÓN DE FIRMAS CONSULTORAS DEL PROYECTO HIDRO-ELECTRICO COCA-CODO SINCLAIR

FINANCIAMIENTO: INECEL - BID - FONAPRI

1988