TUBOS DE EXPLOSION EN EL PEDREGAL DE SAN ANGEL.

Por P. Waltz y E. Wittich. (1)

(Láminas XXVIII-XLII).

Las corrientes de basalto que forman el conocido Pedregal de San Angel tienen su origen en la falda Norte del Ajusco, en la cercanía del pequeño cráter que lleva el nombre de Xitle ó Xietli. (2)

Del cráter moderno del Xitle no ha salido corriente de lava, sino ~~en~~del ~~bajo~~, entre este cono y la parte alta del Ajusco, en que nacen las corrientes que forman el malpaís de San Angel. Estas lavas basálticas tomaron el rumbo hacia la cuenca de México, bajando por las faldas del Ajusco en forma de cataratas para extenderse en el fondo de la cuenca. Aquí se encontraron en su camino con unas lomas antiguas andesíticas que fueron cubiertas á un lado por la lava, teniendo ésta al mismo tiempo un espesor bastante grande para que pudiera desbordarse parte de ella, en forma de corrientes delgadas y pequeñas, por unos portezuelos entre las eminencias de la loma, corriendo hacia el lado oriental en dirección al rincón de Peña Pobre.

El margen frontal de estas corrientes enormes del Pedregal de San Angel se encuentra á unos 16 km del lugar de su nacimiento y forma un arco de 8 km de largo, que se extiende de San Angel por

(1) Compárese E. Wittich: Neue Aufschlüsse im Lavafeld von Coyoacán bei Mexiko, N. J. f. M. G. 1910. II. Bd. pag. 131.

(2) Xietli quiere decir ombligo. Este nombre nos parece mucho más á propósito para el volcán Teuhetli, que se levanta más al Oriente sobre el lago de Xochimilco, encima de un escudo enorme de lava. En sus "Nombres Geográficos de México, Catálogo Alfabético de los nombres de lugares pertenecientes al Idioma Nahuatl," México, 1885, página 234, párrafo "Xitli," Antonio Peñafiel dice: "El cerro que conocemos con este nombre, á cuyo pie subsiste un pequeño pueblo, cerca de Chalco, tiene una depresión, etc," lo que indica que Peñafiel todavía nombraba Xitli al cerro que hoy conocemos bajo el nombre de Teuhetli.

Teuhetli quiere decir "*cerro de las polvaredas*" y precisamente detrás del cerro que hoy día llamamos Xitle se observan con mucha frecuencia polvaredas grandes que se levantan en la estación de secas. ¿No se habrán confundido en tiempos anteriores los nombres antiguos de estos dos volcancitos?

Coyoacán hasta Tlalpan, cubriendo el Pedregal de San Angel una zona de 70 á 80 km².

En la superficie de las corrientes se encuentra hoy día una vegetación raquílica que se limita á las grietas y fracturas de la lava y á las arenas que depositaron el viento y las lluvias en sus oquedades. La superficie de la lava no muestra una descomposición notable, al contrario, por lo regular es muy fresca. Pero puede ser que las lluvias y sobre todo el viento, por medio de la arena que lleva consigo, haya quitado algo de lo áspero de la superficie del basalto, que solamente en algunas partes protegidas se ha conservado. Solamente se han deslavado todos los productos de sublimación, como cloruros, que á las corrientes de lava recién formadas dan sus colores amarillos y rojos.

A causa de este estado de la superficie se observan en ella todavía perfectamente bien las formas características de una masa viscosa que, estando en movimiento, se solidificó. Así se observan en algunas partes trozos alargados que están atravesados en su superficie por arrugas más ó menos concéntricas, indicando por lo tanto la dirección del movimiento é imitando la ornamentación y la forma de un Inoceramos gigantesco (Láms. XXVIII y XXIX); otras veces se observan pedazos torcidos de lava, que salió por presión del interior de la corriente, pasando por un agujero de la costra con orillas endurecidas, adquiriendo de esta manera la forma de un cable torcido (textura acordonada).

En esta superficie se observan cambios de formas muy notables: Al contacto con el aire la superficie de la corriente y su frente se enfriaron rápidamente, y debajo de la costra que así se formó se acumularon los gases, que siguieron desprendiéndose del magma en el interior de la corriente. En algunas partes esta costra, levantada por los gases en forma de bóvedas tendidas y más ó menos extensas, se sostiene todavía en esta posición; en otras, ó la presión de los gases ha sido bastante fuerte para reventarla, ó el peso de la bóveda era tan grande que, al escapar el gas por cualquier rajadura, sin ese sostén se tenía que hundir. (Láms. XXVIII y XXX).

Donde las bóvedas quedaron en su posición, la superficie de ellas es relativamente poco arrugada, mientras que los trozos y fragmentos de las bóvedas derrumbadas tienen una superficie acordonada y arrugada, lo que nos indica que estos derrumbes debieron haber tenido lugar cuando la costra era algo plástica todavía, y se ve que los trozos fueron movidos por la corriente. El aspecto del

Pedregal, por lo tanto, es muy semejante al hielo del mar ártico. En algunas partes del malpaís se nota un alineamiento de los derrumbes descritos y las explicaciones de esto las daremos más adelante.

También en la base de la corriente encontramos una costra bien marcada, sin embargo de que no es tan desarrollada en ella la estructura acordonada y arrugada como en la superficie (1)

En algunas de las canteras que se abrieron últimamente en la parte marginal del malpaís, en Coyoacán (véase lám. XXXI, 1 y 2), se ve que en el interior de la corriente, debajo de la costra escoriosa, la lava tiende á una separación en grandes columnas, cuyos lados frecuentemente demuestran estrías horizontales más ó menos paralelas. Esas estrías se encuentran sobre todo en la parte inferior de las columnas.

En la parte superior de la corriente se acumulan las burbujas en forma de lentes alargados horizontales debajo de la costra escoriosa, disminuyendo hacia el interior de la corriente en tamaño y número. Donde esas burbujas han sido abundantes y grandes, formaron espacios vacíos alargados é irregulares, por lo cual se observa en la roca, en esta parte, una especie de separación en lajas irregulares y torcidas. Frecuentemente se encuentran en las burbujas pequeñas estalactitas y estalagmitas de la misma lava, en forma de gotas y de volcancitos con una superficie lisa (lámina XXXII); otras veces la superficie de las burbujas es áspera y cubierta de cristales lustrosos negros.

En los macizos de la lava compacta de esta corriente se encuentran en diferentes lugares, sobre todo en el margen de las corrientes, depósitos de pedazos de lava porosa de una superficie mucho muy áspera, que se han formado por la expansión de gases y vapores que reventaron la lava compacta, por ejemplo en el margen derecho de la lámina XXXIII.

El espesor de la lava del Pedregal de San Angel alcanza en las canteras de su margen (San Angel, Coyoacán, Huipulco, Tlalpan) 10 metros y más; no se puede determinar á cuántos metros llega en el interior del Pedregal.

---

(1) Descripciones buenas del Pedregal de San Angel nos da G. von Rath en las noticias sobre su viaje por América, dirigidas á la Naturforsch. Ges. zu Bonn (Sitzungsberichte des Naturforsch. Vereines der Rheinlande und Westfal. Bonn 1884, 41, p. 108), y Juan D. Villarejo en "Las aguas subterráneas en el borde meridional de la Cuenca de México." Bol. del Inst. Geol. de Méx. N° 28. México, 1911.

4) Capa de cenizas volcánicas negras con arcilla y tierra vegetal, de vez en cuando con intercalaciones de guijarros andesíticos del Ajusco. Una separación vertical en forma de prismas irregulares, como es típica para la arcilla cuando se seca, es más notable que una estratificación continua; también esta capa contiene mucho tepalcate. Su espesor es de 30 á 40 cm.

5) Arcilla de color gris amarillo con muchos pedazos pequeños de carbón de leña y de tepalcate. Tiene gran semejanza esta capa con lo que se llama en Alemania "Verlehmter Löss" ó "Leimen" y que es un Löss empobrecido en cal por las aguas infiltradas y al mismo tiempo endurecido por reducción de volumen, antes mucho más grande por la porosidad del Löss original. No cabe duda que en esta capa también tenemos un depósito que envuelve los restos de una cultura antigua, como es el caso en Europa. El espesor de esta capa es por lo menos de 30 cm.

Otro perfil de la base de la corriente hemos anotado en las canteras de Huipulco.

1) La lava tiene en este lugar todavía unos 7 metros de espesor. Una corriente de agua sale debajo de la lava entre ésta y las capas de la base.

Contra esta explicación hay que objetar que no se conocen hasta ahora en México productos de esas nubes ardientes, sin embargo de que cualquier día podremos encontrar tales depósitos. Pero las nubes ardientes desarrollan en su curso una fuerza tan grande, que nos parece poco probable que la hubiesen podido resistir plantas tan pequeñas y, menos todavía, restos tan débiles como son estos esqueletos de ceniza incoherente de plantas calcinadas. Depósitos de nubes ardientes, por fin, no tienen ninguna estratificación, mientras que las capas en que encontramos los restos en cuestión, por lo menos demuestran una ligera estratificación.

Una explicación más satisfactoria nos parece, por lo tanto, la siguiente: Al iniciarse la erupción, la vegetación que cubría las faldas del cerro—seca ya por el calor radiante del magma que subió en el interior del cerro (Véase J. Königsberger: "Über die Beeinflussung der geothermischen Tiefenstufe durch Berge, Seen, vulkanische Erscheinungen, chemische Prozesse und Wärmeleitfähigkeit der Gesteine." Comp. Rendu de la Xème Session du Cong. Géol. Int. México, 1906. IIème Fasc., pag. 1144)—se incendió, y encima del pasto ardiente se depositó la ceniza caliente. El resultado debe haber sido una combustión lenta, pero completa, de la vegetación, porque en esta ceniza suelta pudo circular el aire y de este modo la ceniza misma protegió las plantas de tal manera que todos los detalles del esqueleto anorgánico se conservaron perfectamente.

2) Capa de una arcilla muy plástica, de color amarillo, que sirve de fondo impermeable para la corriente de agua, sin embargo de que tiene solamente un espesor de 3 cm. Debajo se halla

3) una capa de cenizas arenosas de grano muy fino, de color obscuro y de 5 cm de grueso; después sigue

4) una capa de turba de color café obscuro, de 15 cm de espesor, en la cual se pueden distinguir todavía restos de plantas no muy carbonizadas. Las capas 3 y 4 no están separadas claramente, sino que existe una transición entre las dos.

5) Debajo encontramos arena acarreada fina, en la cual se hallan las raíces no carbonizadas de las plantas de la turba de arriba. De vez en cuando se intercalan en esta arena unos depósitos de gravas de andesita y pedazos de piedra pómez.

En un punto más alto del relieve antiguo, cubierto hoy por el Pedregal de San Angel, muy cerca de la Escuela de Aspirantes, en la ciudad de Tlalpan, el señor A. Wörn ha mandado hacer unas excavaciones debajo de la lava y se encontró inmediatamente debajo del basalto una capa de cenizas oscuras, y debajo de estas cenizas otra capa de más de 1 m de espesor de cenizas arenosas, de color gris amarillo, con mucho tepalcate.

Detrás de Tlalpan, en donde principian las faldas del Ajusco, las ramificaciones del Pedregal, que mencionamos antes (hablando de las lomas que fueron cubiertas y rodeadas por las corrientes basálticas), se extienden directamente sobre el tepetate y algunas veces sobre la roca andesítica del macizo del Ajusco.

Si añadimos que la base, aun de las partes de la corriente que llegaron en su curso más hacia el N, extendiéndose en el fondo de la cuenca, está al mismo nivel que el fondo moderno del valle en estos puntos, pues en las márgenes de la corriente y sobre todo en las canteras, no se necesita excavar ni un cuarto de metro para llegar á su base, tomando en cuenta esto podemos decir con alguna probabilidad:

1) que el Pedregal de San Angel es de un origen relativamente muy moderno: en el fondo del valle de México el azolve es mucho más importante que la erosión y, por lo tanto, una corriente de lava que se extendió en el Cuaternario en este fondo,—y como se trata de una masa más ó menos líquida, ésta tenía que haberse extendido en el fondo y en las partes más bajas de éste,—debería estar envuelta en su base de aluviones bastantes gruesos; y

2) que el lago que ocupó este fondo al derramarse la lava del Pedregal, debe haberse extendido, cuando mucho, solamente hasta

la zona que está cubierta hoy por la margen de las corrientes; pues en el otro caso, la parte marginal, transformada en mucha mayor escala en tezontle, á causa del contacto de la lava caliente con el agua, hubiera sido cubierta posteriormente hasta mayor altura con los depósitos lacustres que se depositaron más tarde, reduciéndose el vaso del lago hasta la extensión que tenía antes de que se construyera el Desagüe del Valle de México.

Que llegó la lava muy cerca de este lago ó por lo menos hasta sus orillas húmedas y pantanosas, podemos comprobarlo con los tubos de explosión que hemos podido estudiar en la parte marginal del Pedregal, y que nos parecen muy interesantes en varios sentidos y dignos de una descripción y explicación extensas.

En las canteras que se abrieron ó ampliaron en Huipulco, cerca de Tlalpan y en Coyoacán, se ha descubierto últimamente y se descubre todavía una serie de chimeneas más ó menos verticales que, partiendo de la base de la lava compacta, atraviesan toda la corriente, correspondiendo á su parte superior una oquedad pequeña en forma de embudo en la superficie del basalto.

Estas chimeneas no son completamente huecas, sino están rellenas, como se ve en las láminas XXXIII-XXXVI, con una especie de tezontle, es decir, de basalto despedazado y muy poroso, descrito á continuación. Tiene este rellamamiento, en su forma astillosa y fragmentaria, gran semejanza con el que queda en los agujeros que causa un proyectil en un cuerpo sólido pero no muy duro, pues se ve que los pedazos, desgarrados en su mayoría, están unidos con las paredes; por lo tanto, es más adecuado decir que, las paredes de la chimenea, formadas en el basalto compacto, están desgarradas y cubiertas con protuberancias de tezontle que llenan el tubo.

Las chimeneas son, como hemos dicho, más ó menos verticales, pero con frecuencia se nota que su parte superior está algo inclinada al N., hacia el margen de las corrientes, es decir, en dirección de su movimiento. Se observa esto en los acantilados abruptos de la cantera, que cortan siempre partes más bajas de estas chimeneas, en cuanto avanza el trabajo en las canteras y conforme se tumba más material. En la lámina XXXV, por ejemplo, se ve entre las dos chimeneas, en la base de la corriente, un pequeño tubo cuya parte superior ya está tumbada. También en la chimenea, á la derecha, se observa que, mientras que en la mitad y en la parte alta de la corriente el acantilado la corta por su centro, la parte baja apenas está abierta y la mayor parte del pie del tubo queda todavía

metida en la corriente. Con más claridad muestra la inclinación de las chimeneas hacia afuera la lámina XXXVI, donde el pie del tubo, á la izquierda, todavía no está cortado, mientras á la derecha se ve el corte del pie de otra chimenea, cuya parte alta ya se ha caído. En algunos tubos se observa además, que tienen una forma cóncava de la parte media hacia el margen del malpaís.

En la roca misma se observa á la simple vista una diferencia muy marcada: la roca de la corriente es un basalto compacto de ruptura más ó menos concoidea, de color gris oscuro, en el cual se distinguen solamente granos de olivina de color verde amarillento en abundancia. Los poros finos, casi imperceptibles, de la masa céntrica de la corriente aumentan, respecto á su tamaño, hacia la superficie de la corriente y la parte superior está llena de estas burbujas que, con su frecuente alineamiento horizontal y la forma lenticular que demuestra cada burbuja con más ó menos claridad, indican que, al formarse las burbujas, la corriente todavía no estaba completamente consolidada y que se movía todavía algo.

Las paredes de las burbujas mismas á veces son lisas, sobre todo donde se formaron estalagmitas y estalactitas pequeñas (lámina XXXII); pero por lo regular están cubiertas con cristales relucientes negros de magnetita é ilmenita.

Completamente diferente es el aspecto de la lava que llena las chimeneas. Esta roca es muy porosa; los pedazos están separados unos de los otros y la superficie de cada uno es tan áspera y dura que al tocarla lastima la mano. El color es más oscuro, á causa del color negro de la pared de los poros. La olivina es mucho más rara en este basalto y se encuentra solamente en el interior de los pedazos más grandes y más compactos, mientras que falta por completo en la zona superficial de ellos, que por todo su aspecto parece haberse formado por un reventamiento brusco de la lava. Los pedazos grandes demuestran formas torcidas y algunas veces estrías en la superficie áspera, lo que indica que han sufrido movimientos pequeños antes de endurecerse por completo.

Como se ve, las dos rocas, la del interior de la corriente y la del relleno de las chimeneas son bastante diferentes aun á la simple vista (compárense: Láms. XXXII y XXXVII, 2), pero todavía se distinguen más al microscopio.

El basalto del interior de la corriente al microscopio (Lám. XXXVIII, 1 y 2), es algo poroso y tiene una estructura intersticial no muy marcada, con una mesostasis holocristalina-hipidiomorfa;

los fenocristales en su mayor parte son plagioclasas de la composición de una labradorita ($Ab_{40} An_{60}$) en forma de cristales alargados de caras no bien desarrolladas, y de cristales más grandes de olivina por lo regular bien formados y poco atacados por una corrosión magmática, pero con frecuencia rotos.

Los feldespatos tienen la laminación de la albita y á menudo también la de la ley de Carlsbad; rara vez se observa la ley de la perielina. No se observa una estructura zonal notable.

Llama la atención que no hay en esta roca ningún cristal ó grano grande de magnetita que se pudiera tomar por producto de una cristalización primaria, excepto los pequeños cristales que como inclusiones llevan las olivinas y las plagioclasas. En cambio abunda la magnetita en forma de acumulaciones en manchas irregulares y de agujas finas dendríticas en la mesostasis (Lám. XXXIX) que se compone de esta magnetita-ilmenita, de cristales y granos pequeños y mal formados de olivina, de poca augita y de plagioclasa, llenando los intersticios angulares que forman los fenocristales de plagioclasa y de olivina.

El orden de la cristalización en esta roca es el siguiente:

Fenocristales (mayor cantidad): Mesostasis (en cantidad menor):

(Magnetita),	Magnetita-Ilmenita, mucha.
Olivina, mucha.	Olivina, poca.
Plagioclasa, mucha.	Plagioclasa, poca.
	Augita, poca.

Otro aspecto muy diferente tiene la roca de los tubos de explosión. La estructura de ella (Lám. XL, 1) no es porfírica, pues no se hallan fenocristales ni se observa una repetición en la formación de uno de los minerales que componen la roca, sino que la estructura es holocristalina ofítica (ó dolerítica). La textura es mucho menos compacta y es en alto grado porosa. El basalto del interior de los tubos no solamente no contiene fenocristales de olivina, como el basalto compacto del interior de la corriente, sino que este mineral falta casi por completo. En cambio ha aumentado la augita, que se presenta en granos irregulares y prismas alargados, pero su forma cristalográfica siempre es imperfecta. Los otros dos minerales predominantes son también en esta roca la plagioclasa y la magnetita. Esta plagioclasa es más rica en albita que la de la roca compacta y tiene una composición de ($Ab_{45} An_{55}$ hasta $Ab_{55} An_{45}$). También este feldespato está mal desarrollado respecto á sus formas cristalográficas y se presenta en varillas alargadas con lamelación frecuente de

gemelos de albita y mucho más rara según la ley de Carlsbad. La magnetita no se presenta en manchas irregulares como en la roca compacta, sino en forma de esqueletos de cristales y de agujas alargadas. Hay que señalar que estos cristales dendríticos que en las partes más compactas de esta roca de los tubos no tienen un arreglo cristalográfico especial (Lám. XL, 1), se amontonan alrededor de los poros y demuestran en estas zonas un arreglo paralelo á la pared de la burbuja (Lám. XL, 2).

Como último mineral que se encuentra en esta roca hay que anotar cristales aciculares finísimos de una transparencia perfecta, por lo regular sin color, pero algunas veces con un ligero tinte azulado, que se encuentran en forma de agrupaciones irregulares ó aisladamente en los feldespatos, atravesando esos cristales y los granos posteriores de la augita (Lám. XLI, 2). La extinción no se puede medir ni apreciar porque las agujas más gruesas de este mineral son solamente de un ancho de 0,01 mm cuando mucho, y de 0,03 mm. de largo.

El mineral predominante es la plagioclasa y en segundo término la augita. Respecto al idiomorfismo de los cristales se nota la cristalización más perfecta en la magnetita-ilmenita; la plagioclasa tiene ya un idiomorfismo mucho menos desarrollado y las augitas carecen de formas con caras cristalográficas buenas. Esto indica que la cristalización principió con la de la magnetita. Como el desarrollo de esos cristales no era igual en todas las direcciones, sino que la magnetita creció con preferencia en un sentido, resultaron cristales dendríticos aciculares (esqueletos de cristales) y de esto debemos concluir que la cristalización fué rápida. Al acabarse la cristalización de Fe_2O_3 y Fe Ti O_3 principió la de la plagioclasa—las agujas de la magnetita pasan por los granos de la plagioclasa y de la augita—y por fin la de la augita que llenó los intersticios que quedaron en el tejido entre los minerales ya cristalizados. La formación de los dos últimos minerales no fué separada por completo, sino que la cristalización de la plagioclasa seguía mientras ya había principiado la de la augita.

Desde un principio nos pareció interesante averiguar si hubo también un cambio en la composición química en la roca, en los lugares donde se formaron los tubos de la explosión; pero como no se esperaba que la lava de la corriente en que se encuentran las chimeneas en cuestión, fuera de una composición química muy variable, no se procuró tomar una serie continua de muestras desde el interior

compacto de la corriente hasta el interior poroso de los tubos. Damos en seguida tres análisis de rocas de las canteras de Huipulco, solamente para indicar el cambio que se nota en las diferentes partes aún muy cercanas de la lava, y publicaremos en un trabajo posterior un estudio petrográfico y químico detallado de una serie continua desde el interior compacto hasta la pared de un tubo y de la lava del tubo mismo.

	I	II	III
Humedad	0,05%	0,07%	0,09%
H ₂ O al rojo	0,11	0,15	0,15
Si O ₂	51,42	53,45	50,74
Ti O ₂	1,64	3,04	2,17
Al ₂ O ₃	18,03	14,57	16,30
Fe ₂ O ₃	2,54	4,40	1,55
Fe O	7,17	7,25	7,96
Mn O	0,13	0,29	huellas
Mg O	5,39	4,03	8,15
Ca O	7,98	6,51	7,92
Na ₂ O	3,87	4,12	3,04
K ₂ O	1,23	1,55	1,68
P ₂ O ₅	0,47	0,50	0,57
Suma	100,03%	99,93%	100,32%

El análisis designado con el número I corresponde á una muestra sacada de la roca compacta del interior de la corriente, lejos de los tubos de explosión; el número II es el de una muestra de la pared de un tubo (Lám. XXXVII, 1 y XLII, 1 y 2) y el número III es la composición cuantitativa del basalto poroso y áspero del relleno de uno de esos tubos (Lám. XXXVII, 2 y XL).

Estos análisis, hechos por el señor Carlos Castro, Químico del Instituto Geológico Nacional, calculados según el método de Osann, dan las siguientes fórmulas petrográfico-químicas.

- I. S=56,97; A=4,90, C=6,58, F=20,07. $s_{57.0}$; a_3 , c_4 , f_{13} ; $n_{8.2}$, $m_{8.7}$, $k_{0.91}$.
 II. S=60,65; A=5,42, C=3,92, F=20,68. $s_{60.6}$; $a_{3.5}$, $c_{2.5}$, f_{14} ; $n_{8.9}$, $m_{8.5}$, $k_{0.99}$.
 III. S=55,43; A=4,25, C=5,90, F=24,27. $s_{55.4}$; $a_{2.5}$, $c_{3.5}$, f_{14} ; $n_{7.3}$, $m_{8.7}$, $k_{0.93}$.

Ya el aspecto de esas chimeneas nos da la idea de que deben ser originadas por una explosión de gases que se efectuó en la base de la corriente. También se ve á primera vista que la lava todavía no estaba completamente consolidada, porque una explosión en roca

dura podría hacerla pedazos, pero nunca podría cambiar su aspecto estructural y mineralógico, y la forma de la oquedad, causada por la explosión, sería la de un embudo y no la de una chimenea. Además, que la lava todavía se movía, lo indica la circunstancia de que todos los tubos en las canteras de Huipulco y de Coyoacán en su parte superior tienen una inclinación hacia el margen de la corriente.

La explosión debe haberse formado en la base de la corriente, porque todos los tubos perforan toda la capa de basalto y ninguno principia en el interior de la corriente. Por lo tanto, los gases que causaron la explosión no son gases que se produjeron en la corriente, sino en el contacto de ella con el subsuelo y, como coincide este nivel con el del agua subterránea, no cabe duda que el vapor de agua haya sido la fuerza que originó los tubos de explosión. Por lo tanto, se trata de *explosiones freáticas* en el sentido en que usa Suess (1) esta palabra. Pero las explosiones freáticas que describe el sabio geólogo se efectuaron todas al contacto de un magma ó de gases muy calientes juveniles con el límite inferior de una capa de agua ó de un sedimento húmedo, y los tubos de explosión respectivos se formaron en las capas que había encima de este contacto y fuera del magma que las causó, mientras que en el Pedregal de San Angel tenemos tubos de explosión que se formaron en la lava que al contacto con el límite superior de la capa de agua causó la evaporación rápida del líquido y por la expansión de ese vapor la perforación de ella misma. Para distinguir esas dos formas de tubos de explosión nos parece útil distinguirlos también por la nomenclatura y proponemos nombrar los tubos que enumera y describe Suess, y de los cuales habla también Branca en todas sus publicaciones respecto á estos fenómenos, *tubos de explosión "exogenéticos,"* mientras que los tubos del Pedregal de San Angel los nombramos *tubos de explosión "endogenéticos."*

Hemos visto que en la zona donde se formaron las chimeneas la lava todavía no estaba consolidada por completo. Según las observaciones microscópicas sobre el orden de la cristalización de los diferentes minerales: magnetita—olivina—feldespatos—mesostasis en el magma de la corriente, y magnetita—feldespatos—augita en la roca de la chimenea, debemos aceptar que cuando se efectuaron las explosiones, todavía no se habían formado los fenocristales.

(1) Antlitz der Erde, III. Band 2 Abt. pág. 655. Wien, 1910.

Es muy difícil—sobre todo sin experimentos especiales que se pueden hacer solamente con aparatos contruidos á propósito para tales investigaciones—determinar aun sólo aproximadamente la temperatura que tenía la lava en el momento de la formación de las chimeneas; pero debe haber tenido por lo menos una temperatura mayor de 700° (1). Pero ya una temperatura mucho más baja del basalto bastaría para producir un vapor de agua de una tensión suficiente para reventar una capa de basalto de 10 m de grueso y de un peso específico de 3 más ó menos. Tal capa ejerce una presión de unos 30 kg por cm² y el vapor de agua, que tiene una tensión que equivale á 30 kg = 30 atmósferas, todavía no necesita tener una temperatura mayor que 250°.

Es preciso que procuremos ahora formarnos una idea sobre el modo del movimiento de la corriente basáltica de estos malpaíses y, por lo tanto, de las corrientes del Pedregal de San Angel. En los últimos años, en la Isla de Savaii, que pertenece al archipiélago de Samoa en el Océano Pacífico, el Volcán de Matavanu ha entrado en una actividad que, además de haber sido explosiva al principio, sobre todo se hizo muy dañosa y destructora por la emisión de corrientes de lava en gran escala. El Dr. Carlos Sapper, que también conoce nuestro país, habiendo sido por algún tiempo miembro de la Comisión Geológica Mexicana, ha reunido todos los datos que pudo conseguir sobre este período de actividad del Matavanu y las publicó en la Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde (2).

Reproduce Sapper (l. c., pág. 507 del segundo trabajo) entre otros detalles también este párrafo de un artículo del Dr. Grevels, publicado en la "Kölnischen Zeitung": ".....Después de otra hora llegábamos á la orilla de la corriente oriental de la lava que constantemente aumenta en longitud y anchura. De la parte inferior del muro movedizo ("vivo") de 3-6 m de alto salen sin interrupción hilos y chorritos ígneos de lava, y constantemente se desprenden á

(1) Según unos experimentos hechos por Doelter y A. Schertel, "diferentes basaltos de feldespatos se funden, ó mejor dicho se reblandecen entre 1000° y 1100°." La temperatura de la corriente del Pedregal, al efectuarse su consolidación, probablemente ha sido menor á causa de la sobrefusión que produce la solidificación á una temperatura menor que la que corresponde al punto de fusión de la lava. Doelter: Physikalisch-Chemische Mineralogie. Leipzig, 1905, pág. 156.

(2) Berlín 1906, pág. 686. Der Matavanu-Ausbruch auf Savaii 1905-06 y Berlín 1909, pág. 501. Neuere Mitteilungen über den Matavanu-Ausbruch auf Savaii.

media altura bloques de esta muralla, mientras que su parte superior parece ser empujada por una fuerza invisible, hasta que se desploma y por fin se derrumba. La corriente se compone aquí en su mayor parte de bloques de medio hasta un pie cúbico, de color rojo pardo ó amarillo pardo “(véase página 170).” Sin embargo de que por todos los agujeros entre los bloques se veía el rojo de la ignición del interior, la superficie de las piedras de afuera era poco caliente y se pudo trepar por ellas, pero no es muy agradable hacerlo por el movimiento sospechoso y poco simpático de la lava.”

En diferentes períodos y en diferentes lugares la lava de las corrientes del Matavanu tenían diversas velocidades, como por ejemplo en la costa, en Febrero de 1906, 7 y 5 m por hora, en otro punto 123 m por día (l. c. 1906, pág. 694); en un punto observó I. Friedländer una velocidad de 10-15 m por segundo (Sapper, l. c. 1909, pág. 528, nota), pero no se dice á qué distancia del cráter, en qué declive del terreno se hizo esta observación, ni si era el conducto de lava superficial ó subterráneo. Sobre todo esta última circunstancia habría sido de muchísimo interés, pues es muy probable que se tratara de la evacuación de una bolsa de lava, obrando estas bolsas como un conducto de presión en el cual la lava está resguardada contra el enfriamiento. Precisamente este fenómeno tenía lugar durante mucho tiempo en el Volcán de Matavanu, donde se observó que la lava corrió del cráter á un túnel formado en el interior de una corriente anterior que superficialmente ya estaba completamente endurecida y enfriada, para salir de esta corriente en su borde acantilado inferior. Si se toma en cuenta que el túnel principió en el borde del cráter á una altura de 600 m más ó menos sobre el nivel del mar y se prolongaba hasta la costa, que dista unos 12 km. del cráter, se puede imaginar que la lava debe haber salido de la abertura inferior de ese conducto de presión, cerrado en toda su extensión, con una fuerza enorme que explica perfectamente la velocidad, á primera vista asombrosa, de 10-12 m por segundo.

También la lava del Pedregal de San Angel, á la cual se parece mucho el basalto de plagioclasa que arrojó el Matavanu y que fué estudiada petrográficamente por el Sr. Prof. Max Weber (1), debe haber corrido del mismo modo. Saliendo de una altura de 3,000 á 3,100 m sobre el nivel del mar en el flanco del Ajusco, habrá bajado

(1) Abhandlungen der Königl. Bayerischen Akad. d. Wiss. II Kl. XXIV. Bd., II Abt. pág. 289. München 1910 “Zur Petrographie der Samos Inseln.”

do la avalancha de lava, compuesta de bloques y de lava ígnea líquida, por la pendiente fuerte al Sur de San Angel, presentando el grandioso espectáculo de una enorme cascada ígnea. Al enfriarse y endurecerse la superficie de esta cascada se habrá formado en su interior un conducto por el cual corrió la lava, conservando su alta temperatura, hacia el fondo del valle, á 2,300 m. Al extenderse en éste se enfrió superficial y marginalmente, y por lo tanto ya no podía correr y extenderse como un líquido, sino el modo de su avance parecía más bien el desarrollo de una alfombra enrollada, desplo-mándose y derrumbándose el muro en el margen de la corriente. Derrumbándose por el empuje de la lava la muralla frontal, el magma líquido del interior de la corriente se desparramó sobre los derrumbes, y en la superficie se formó de nuevo el obstáculo y el fenómeno se repitió. Mientras se formó de esta manera una corteza resistente en la superficie de la corriente, el interior de ella quedó líquido y conservó su alta temperatura. En este estado de cosas se puede comparar la corriente con una bolsa en que se mete arriba un líquido que ejerce la mayor presión en el punto más bajo de la bolsa y rompiéndose en este punto, es decir, la muralla marginal y desparramándose encima de ella la lava, que se enfría superficialmente con rapidez, avanzó la corriente en el fondo del valle unos 700 m abajo del punto de su origen y á unos 12-16km de ese lugar.

En la mayor parte de su camino la corriente avanzó sobre una capa de ceniza más ó menos seca y solamente ya muy adentro de la cuenca debe haber encontrado terreno húmedo y en parte pantanoso. La base de la corriente, que tiene un aspecto escoriado y quebrado, fué formada por los derrumbes de las murallas, soldados en seguida de nuevo por la lava que se extendió encima, y por lo tanto no es otra cosa que una superficie ó un margen de la corriente y tiene por eso la misma estructura que la escoria que forma la superficie de la corriente hoy día.

Se comprende que, cuando la lava corrió sobre un suelo en el cual á poca profundidad había agua, ésta no se evaporó inmediatamente, transformando la masa de lava en tezontle, lo que se habría efectuado cuando la evaporación hubiese sido instantánea. Al contrario, por la mala conducción del calor de las cenizas, la lava podía seguir su camino por algún tiempo encima de ellas sin que se hubiera efectuado una explosión; pero en el momento en que el agua del subsuelo ya recibía todo el calor de la corriente ígnea-líquida que

se había extendido encima, y la tensión del vapor producido por este calor ya era bastante grande, se tenía que efectuar la explosión formándose un tubo de escape para estos gases en la masa viscosa del basalto.

Al producirse esta explosión el vapor podía salir, aumentando su volumen enormemente, y como esto significa trabajo, la expansión estaba acompañada de un gasto de calor que fué sacado en primer lugar de las paredes entre las cuales estaba encerrado el vapor y del tubo por el cual escapó. A causa de esto las paredes del tubo, desgarradas por un lado por la explosión y porosas por otro por el desprendimiento de gases propios de la lava, y absorbidos y retenidos en ella bajo presión en el interior de la corriente, se solidificaron instantáneamente al haberse efectuado la explosión, y de tal manera, quedó en la masa líquida de la corriente una chimenea sólida con una bóveda—una especie de caldera—abajo y un ensanchamiento en forma de embudo arriba. Las paredes del tubo, naturalmente, no están lisas sino cubiertas de protuberancias muy porosas y muy ásperas que llenan el tubo y que, si aun arrastradas por la fuerza de los vapores en un principio, fueron plegadas hacia arriba, al acabarse el escape por su peso se doblaron hacia abajo como se ve en las láminas.

Durante y después de la explosión la corriente continuó su avance, llevando consigo las chimeneas endurecidas y, como la parte superior y sobre todo la parte media tenía mayor velocidad que las partes basales, que por la fricción con el subsuelo fueron detenidas, las chimeneas consiguieron una inclinación y una encorvadura convexa hacia el margen de la corriente, como lo hemos descrito antes.

Una indicación de un fenómeno al parecer muy semejante la encontramos en las descripciones de la erupción del Matavanu citadas antes (l. c. 1909, pág. 132, nota) y que se describe con las siguientes palabras: "... En la noche del lunes se efectuó una explosión grande por la cual se formó una gran abertura en la masa de la lava. Tenía esta abertura un diámetro de 50 m. La masa líquida fué lanzada al aire á una altura de 100 pies. Ahora la lava ya se ha enfriado, pero al principio se creía que se hubiera formado un cráter nuevo. El lugar donde esto pasó está situado en el centro de la ciudad (Saleaula), donde se encontró la fuente antigua. Durante los primeros días que corrió la lava hacia Saleaula, sobre todo en la noche, las dos corrientes ofrecieron un espectáculo terriblemente hermoso: las casas y árboles incendiados, las explosiones

que se efectuaron en todas partes en la lava, que de vez en cuando avanzó con una velocidad de 8 m. por minuto." Hay que añadir que Saleaula está en la zona de los esteros de la costa!

La única dificultad que encontramos en explicar los fenómenos de los tubos de explosión en el Pedregal de San Angel, es, que estos tubos se hallan agrupados y que la distancia entre ellos es muchas veces tan sólo de unos cuantos metros. ¿Por qué—nos preguntamos—una vez perforada la lava, y la caldera debajo de ella en comunicación con el exterior, no se escapaba por esta chimenea todo el vapor que estaba acumulado en la base y continuaba formándose? La única explicación satisfactoria que podemos encontrar es la siguiente: El vapor que estaba acumulado debajo de la lava antes de hacer explosión, podía levantar en uno y otro punto la lava en forma de una bóveda pequeña, y en el punto más alto de la bóveda más grande se efectuó en seguida la explosión, porque aquí la presión de la lava ígnea líquida era menor. Al efectuarse la explosión se escapó gran cantidad de vapor entremezclado con pedazos de basalto poroso, con polvo de éste y con una cantidad pequeña de las cenizas del suelo. Con la explosión no se acabó el escape de vapor, sino éste duraba algún tiempo, y el tubo, medio obstruido ya por las protuberancias de las paredes, por los pedazos de tezontle y por el polvo, dejó salir en un principio el vapor; pero todas las partículas que llevó éste consigo, tenían que depositarse en las asperezas del tubo, más aún cuando las protuberancias, dobladas hacia abajo, se consolidaron por completo, y, por lo tanto, en poco tiempo la chimenea, y sobre todo la caldera en la base, tenía que obstruirse completamente. La cohesión del basalto endurecido y relleno en sus oquedades por el polvo fino impermeable, impidió que en este punto se formara una nueva explosión, y en el momento en que el vapor tenía la tensión suficiente, se efectuó una nueva explosión, formándose una nueva chimenea al lado de la primera, pero en la lava ígnea-líquida, cuya perforación era más fácil.

Claro es que el margen de esta parte de la lava donde se formaron los tubos de explosión, en cuanto el número de tubos aumentó, disminuyó de velocidad, hasta que por fin esta zona marginal, ya cesando su avance por completo, formó un obstáculo para el magma que lo empujaba, y éste tenía que salir por un lado, como se observa en Huipulco, donde una corriente secundaria salió al W de la zona de los tubos de explosión, extendiéndose allá mucho más al N, probablemente sobre una especie de península formada por un delta anti-

gua. Una zona alargada de hundimientos de la lava (Láms. X y XXX) parece indicar que á lo largo del arroyo húmedo, que corrió al lado de este delta poco levantado, había una evaporación lenta que produjo un levantamiento de la costra superficial de la corriente, sosteniendo la bóveda por algún tiempo hasta que por fin ésta casi en toda su extensión se derrumbó. Semejantes hundimientos alargados pueden haberse formado también á lo largo de un canal ó conducto de lava en el interior de la corriente, sobre todo en terreno más inclinado (1) como se ha podido observar en las últimas erupciones del Matavau que, para repetirlo de nuevo, deben haber tenido gran semejanza con las que formaron el Pedregal de San Angel. Como estas formaciones en la República Mexicana son tan frecuentes, más es de sentirse que la erupción del Matavau no haya sido estudiada sistemáticamente por una comisión de vulcanólogos competentes.

(1) Waitz: "Le Volcan de Colima." Guide des Exc. de X^{ème} Cong. Géol. Int. México 1906. fasc. XIII, pág. 13, "Observaciones Geológicas acerca del Pico de Orizaba," este Boletín pág. 73, Villarello, l. c., pág. 19., y Dr. E. Haarmann: "Sobre una cueva en una corriente de lava en el Estado de Puebla," este Boletín pág. 141. Más datos sobre las erupciones del Matavau y unas correcciones de sus noticias anteriores publicó C. Supper en el último tomo de la Zeitschr. der gesellsch. f. Erdk. zu Berlin 1911:

"Nachrichten über den Ausbruch des Matavau auf Savaii aus den Jahren 1909 und 1910," 1911 No. 3, pág. 172 y "Der Matavau auf Savaii am 9. April 1911" (carta del Sr. Dr. W. Grevel-Vaipuli) 1911, No. 7, pág. 485.

En estos dos artículos se encuentran citadas las demás publicaciones sobre las erupciones del Matavau.

Una corrección importante y de interés para nosotros es que la abertura que se produjo en Saleaula, donde se encontró la fuente antigua (véase pág. 184), no tenía 50 m de diámetro sino solamente unos 16 m, diámetro que tienen también varios de nuestros tubos de explosión en el Pedregal de San Angel.

He aquí la traducción de este párrafo (l. c. 1911, No. 7, pág. 173):

"Dr. Grevels me avisa que el jefe político Williams se equivocó dando 50 m á esta abertura, que solamente habrá tenido unos 16 m.

"La masa líquida de que se habla en el mismo párrafo era lodo.

"La pared blanqueada de la iglesia que quedó en pie, era salpicada en este lado con el lodo....."

Fot. P. Waitz.

Bóveda de basalto derrumbada. Estructura acordonada de la superficie de las partes derrumbadas.

Fot. P. Waitz.

La parte superior, embudiforme, de un Tubo de Explosión, con una corriente pequeña encima del basalto. (Estructura acordonada).

Fot. P. Waitz.

Bóveda derrumbada de la corriente.

Fot. P. Waitz.

Separación en columnas, de la lava del Pedregal de San Angel en las canteras de Coyoacán. [Material derrumbado para la explotación de la cantera.]

Fot. F. de P. Carbajal.

Estalagmita de lava en una burbuja de la costra superior.
(Tamaño natural.)

Fot. P. Waitz.

Tubo de explosión con la caldera en su parte inferior y el embudo en la parte superior. A la derecha la base de la corriente y en el margen derecho una zona de basalto reventado. Cantera de Coyoacán.

Fot. P. Waitz.

Tubo de explosión en la cantera de Huipulco. Al pie de la corriente se ve el nivel del agua y en la parte superior se observa el aumento de las burbujas.

Fot. P. Waitz.

Dos tubos de explosión en la Cantera de Huipulco. Entre los dos el resto de la parte inferior de otro. Al pie de la corriente se ve el nivel del agua.

Fot. P. Waitz

A la izquierda un tubo de explosión cuya parte inferior todavía queda metida en la corriente y á la derecha el pie abierto de otro, mientras su parte alta ya ha sido destruida por la explotación.

Fot. F. de P. Carbajal.

Transición de la lava compacta del interior de la corriente á la esponjada de los tubos. 1 Transición en la pared del tubo. 2 Lava del tubo.

1

Fot. F. de P. Carbajal.

2

Basalto de plagioclasa compacto del interior de la corriente.
A la izquierda una olivina grande con un agujero. Aumento
20 veces. 1 con polarizador solo. 2 con nicoles cruzados.

1

Fot. F. de P. Carbajal.

2

Cristales dendríticos y en forma de esqueletos de cristales de la magnetita-ilmenita en la mesostasis del basalto compacto del interior de la corriente. 1 luz polarizada, 2 nicoles cruzados. Aumento 85 veces.

1

Fot. F. de P. Carbajal.

2

Basalto de plagioclasa de estructura ofítica de la lava esponjada de los tubos de explosión. Aumento 20 veces, luz polarizada. 1 Interior, 2 margen de un pedazo. En 2 se ve el paralelismo de la magnetita-ilmenita cerca de la oquedad.

1

Fot. F. de P. Carbajal.

2

1. Formas de esqueletos de cristales de magnetita-ilmenita con plagioclasa y augita en el basalto del interior de los tubos. Aumento 50 veces, luz polarizada.
2. Cristales aciculares atravesando las plagioclasas y augitas del basalto de los tubos. Cristales dendríticos de magnetita-ilmenita. Aumento 170 veces, luz polarizada.

1

Fot. F. de P. Carbajal.

2

Transición del basalto del interior de las corrientes al de los tubos. Lámina de la roca 1 en Lám. XXXVII. Aumento 20 veces. 1 luz polarizada, 2 nicoles cruzados.