

**TECNICAS DE PROSPECCION GEOQUIMICA PARA
URANIO EN COLOMBIA ¹**

CALIXTO ORTEGA MONTERO ²

¹ Manuscrito recibido: Noviembre de 1974.

² Departamento de Geología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Instituto de Asuntos Nucleares, Bogotá.

RESUMEN

El siguiente método ideado por el Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) de Francia (1958), modificado por el Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare (CNEN), italiano y puesto a punto en los laboratorios del Instituto de Asuntos Nucleares de Colombia (IAN), tiene como objeto la determinación cuantitativa de trazas de Uranio presentes en aguas, rocas y aluviones. Tiene una sensibilidad de determinación desde 0,1 ppb en aguas y 0,1 ppm en aluviones y rocas. Es un método eficaz y económico, que permite cubrir grandes áreas en poco tiempo, obteniendo así la pronta individualización de anomalías geoquímicas, sobre todo en áreas montañosas y de muy difícil acceso. Se realizó una prospección de orientación en el área de California (Santander) donde se han determinado altos contajes radiométricos y minerales de Uranio; los resultados son halagadoramente satisfactorios y nos muestran la bondad de este método.

ABSTRACT

The method described herein was developed by the Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) of France (1958), completed by The Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare (CNEN), and applied in the Instituto of Nuclear Affairs of Colombia, the technique is based on a quantitative determination of Uranium traces present in water, rocks and alluvial deposits. The sensitivity of determination is 0,1 ppb in water and 0,1 ppm in alluvial deposits and rocks. The method is efficient, economic and permits to cover large areas in short time, obtaining a fast individualisation of geochemistry anomalous, specially in mountainous and difficult access areas. An orientation prospection was carried out in the area of California, Santander; where it had been determined high radiometric counts and Uranium minerals. The results were successful and showed the effectiveness of the method.

INTRODUCCION

La posibilidad de la prospección geoquímica en la búsqueda y localización de un elemento dado, está íntimamente relacionada, por una parte, con el conocimiento del comportamiento geoquímico de este elemento dentro de los diferentes medios de la superficie y, por otra, con la disponibilidad de métodos analíticos lo suficientemente sensibles y prácticos para lograr una detección rápida y segura de las anomalías geoquímicas.

En el caso del Uranio debemos tener en cuenta lo siguiente:

El Uranio es un elemento oxífilo que se presenta principalmente bajo la forma del ión tetravalente U^{+4} y del ión hexavalente U^{+6} , este último asociado a dos iones de oxígeno, constituyendo el ión uranilo UO_2^{+2} . En el estado tetravalente es poco soluble y el óxido UO_2^{+2} es fácilmente disociado (Rankama et al., 1962).

Las condiciones dentro de las cuales el U^{+4} es oxidado en U^{+6} están sometidas al potencial de óxido reducción del medio que varía con la composición, temperatura y presión. Se puede decir que el U^{+4} es oxidado en U^{+6} dentro de las mismas condiciones en que el Fe^{+2} pasa a Fe^{+3} (Dall'Aglio et al., 1960).

El ión hexavalente es mucho más soluble que el tetravalente y forma con diferentes aniones (CO_3' , SO_4' , PO_4' , F) complejos dentro de los cuales el ión Uranil-Carbonato y el ión Uranil-Sulfato son los más importantes.

Los complejos Uranil-Carbonatos predominan dentro de un $ph = 4,5$ mientras que los complejos Uranil-Sulfatos son estables a ph comprendidos entre 1,5 y 4. En torno a $ph = 4$ domina el complejo Uranil-Hidroxilo mientras que los complejos húmicos y fúlvicos existen en las proximidades de la neutralidad (Dall'Aglio et al., 1960).

La precipitación interviene bajo la acción de modificaciones de ph , Eh y temperatura.

La fijación del Uranio puede tener lugar por los hidróxidos de hierro, manganeso, minerales arcillosos, fosfatos y materias orgánicas (Rankama et al., 1962).

La gran movilidad del Uranio en las capas superficiales de la corteza terrestre, dentro de una amplia gama de ph y su propiedad de formar compuestos naturales solubles en el agua, le permite migrar fácilmente en ese medio dando lugar a la formación de anomalías hidrogeoquímicas que pueden ser detectadas a varios kilómetros de los centros de dispersión.

Si a lo anterior añadimos la circunstancia de disponer para su determinación de técnicas fluorimétricas susceptibles de responder satisfactoriamente a las exigencias de la prospección, como son sensibilidad, fidelidad, simplicidad, rapidez y bajo costo, hacen que la técnica de prospección geoquímica sea perfectamente aplicable a la investigación y localización de menas uraníferas.

Comportamiento geoquímico del uranio.

Dentro de la corteza terrestre el Uranio se encuentra principalmente en el seno de las rocas ígneas ácidas, ya sea como minerales primarios de Uranio o dentro de los minerales accesorios bajo la forma de adiciones isomórficas o dentro de los minerales mayores bajo la forma de inclusiones (Berthollet et al., 1958).

La alteración de fuentes primarias de Uranio conduce a liberarlo en forma hexavalente, estable en solución acuosa dentro de una larga gama de ph. Después de un desplazamiento más o menos importante, es susceptible de depositarse singenéticamente con ciertos sedimentos y de fijarse epigenéticamente en cualquier clase de rocas, inclusive en formaciones sedimentarias aún no consolidadas (Berthollet et al., 1958).

Los suelos son materiales de fijación importante debido a los minerales arcillosos, materia orgánica, hidróxidos de hierro, de manganeso y aluminio que ellos contienen.

Técnicas utilizadas.

A) *Muestreo*: Es una operación delicada y determinante en la mayoría de los casos de la reproducibilidad de los resultados obtenidos.

En las etapas preliminares del desarrollo de este trabajo el muestreo se hace sobre agua y aluviones.

Los aluviones son los materiales más frecuentemente utilizados en prospección geoquímica general. Están distribuidos a lo largo de toda la red hidrográfica, son fáciles de recoger y constituyen una muestra promedio de la cuenca situada aguas arriba del punto de muestreo (Hawkes et al., 1957). Son generalmente tomados en el lecho vivo, procurando escoger la fracción de aluvión más fino, eligiendo los puntos donde el curso de agua reduce su velocidad de corriente. En los cauces secos las muestras deberán ser tomadas sobre las vías de escurrimiento de las aguas

de lluvia coincidentes con el lecho del arroyo. Una cantidad de 200 grs. es suficiente y representativa. Se deben anotar las características más importantes del material muestreado, tales como granulometría, naturaleza del cauce, materia orgánica, etc.; tienen la ventaja de poder ser utilizadas para la investigación de diferentes elementos. Las aguas por su parte tienen la ventaja de ser muy homogéneas, lo que permite un muestreo representativo del medio, con muestras de pequeña dimensión (Hem et al., 1959). Al practicarse el muestreo se buscan las aguas en movimiento, la muestra debe ser límpida e incolora, exenta en lo posible de sedimentos en suspensión. En el sitio de muestreo se debe también tomar la temperatura, el ph y la conductividad del agua en cuestión, con el fin de tener una idea de la acidez y controlar el carácter químico del agua, ya que la medida de la conductividad nos expresa una medida de la carga salina. También debe tomarse nota de la naturaleza del agua (subterránea o superficial), caudal del curso, color, limpidez, velocidad de la corriente, radioactividad, etc.

Resulta indispensable proceder al tratamiento de las muestras de agua inmediatamente después de haber sido recogidas, evitando así la prolongada conservación de las mismas. El Uranio en las aguas al estado de extrema dilución puede sufrir fenómenos de coprecipitación y adsorción por parte del material en suspensión, materia orgánica, organismos y aun por las paredes del recipiente.

Estos inconvenientes han sido resueltos de una manera satisfactoria por personal de CEA de Francia (Berthollet et al., 1958), que han desarrollado un método práctico que responde a las exigencias requeridas. Dicho método consiste en concentrar una muestra de agua (generalmente 10 cm³), directamente sobre una banda de papel cromatográfico. El agua asciende en el papel por capilaridad, junto con las sales en solución y es detenida a una altura determinada por acción de una fuente de rayos infrarrojos que provoca la evaporación continua del líquido dejando los constituyentes sobre el papel. Este método fue posteriormente modificado ligeramente en Italia por el Comitato per le Ricerche Nucleare CNEN (Dall'Aglio et al., 1960) que construyó evaporadores basados en convección de aire caliente que evita la posible carbonización del papel. Al mismo tiempo fueron diseñados estos evaporadores para ser alimentados tanto por energía como por gas de garrafa, lo que facilita el trabajo en el campo.

Las bandas de papel así obtenidas pueden ser conservadas durante mucho tiempo sin peligro de alteración.

El CNEN de Italia considera necesario, para comprender el carácter químico del agua en cuestión, determinar el contenido de elementos mayoritarios en el agua (Ca, Na, K, Mg, HCO₃, SO₄, Cl) junto con el ph, temperatura y conductividad (Dall'Aglio et al., 1960). El CEA de Francia

no considera necesario determinar el contenido de estos elementos, ya que una medida aproximada de esta composición química se obtiene con la medida de la conductividad.

En desarrollo del presente trabajo se ha seguido el criterio CEA considerando que para prospecciones regionales no es necesario un refinamiento depurado de la composición química del agua, solamente tener una idea del tipo del agua necesario para la ulterior interpretación de resultados. Sin embargo en casos especiales de prospección detallada y en casos de no muy fácil comprensión de los fenómenos geoquímicos, un análisis de los constituyentes mayores del agua puede arrojar mucha luz sobre el asunto.

B) *Determinación del Uranio:* Para el caso del agua, teniendo la muestra concentrada en el papel cromatográfico, se procede a la separación cromatográfica. Para esto se usa generalmente Tributil fosfato y éter de petróleo como eluente. El Uranio viene transportado cuantitativamente con el frente del eluente, mientras todos los otros elementos sufren traslados muy pequeños.

El pedazo de tira cromatográfica que contiene el eluente y el Uranio presente en la muestra, es transportado a una cápsula de platino donde es calcinada.

A la ceniza se le agrega una pastilla de una mezcla de KF, Na_2CO_3 (cerca de 200 mgr) y se lleva a fusión. Teniendo esta pastica fundida se procede a la determinación del Uranio por métodos flurimétricos (Grimaldi et al., 1954).

El principio de este método se basa esencialmente en la medida de la intensidad de la luz de fluorescencia de sales de Uranio excitadas con luz ultravioleta.

Esta fluorescencia es debida a la presencia de iones uranilo. El test fluorescente para uranio es específico cuando la banda de excitación se sitúa en los contornos de una longitud de onda de 3600 \AA . Las bandas de fluorescencia por su parte se sitúan entre 4700 y 6000 \AA (Grimaldi et al., 1954). Este método tiene la ventaja de que es selectivo para Uranio, evitando en muchos casos las separaciones químicas. Por otra parte es el más sensible hasta ahora conocido para mediciones de Uranio (permite mediciones para aguas desde $0,1 \text{ ppb}$ y para rocas y aluviones desde $0,1 \text{ ppm}$).

Para las muestras de aluviones después de haber sido secadas y tamizadas (generalmente a 100 micrones) se toma 1 gr. de la parte fina; se lleva a un tubo de ensayo donde es atacado con ácido nítrico $2,5 \text{ N}$ en baño maría durante unos 60 minutos. Posteriormente se transporta parte de esta solución a una tira de papel cromatográfico y se procede a partir de este punto como se ha descrito para el análisis de aguas.

C) *Interpretación de resultados*: El paso final de un levantamiento geoquímico conlleva a una cuidadosa interpretación de los resultados. No existen reglas definidas al respecto; sin embargo un conocimiento de los factores que pueden contribuir a la formación de las anomalías geoquímicas y la elaboración de mapas y diagramas, nos ayudan a visualizar en forma objetiva la presencia o no de anomalías geoquímicas y su evaluación.

De todas maneras no se deben olvidar ciertas guías que son importantísimas para la correcta interpretación final, como son:

1. Las relaciones con la geología (petrografía, tectónica).
2. El relieve, la vegetación.
3. El valor medio de los tenores.
4. Condiciones climáticas.
5. Laboreo minero.
6. Actividad humana.

En el caso del Uranio también es importante tener en cuenta las lecturas radiométricas.

Prospección geoquímica de orientación.

Como es sabido, en todo trabajo de prospección geoquímica, cualquiera que sea el elemento investigado, existen 3 etapas principales que deben ser consideradas:

1. Investigación de orientación.
2. Prospección de rutina.
3. Interpretación de resultados.

El objeto fundamental de la primera etapa es determinar la factibilidad de utilización de esta técnica en la resolución de los problemas planteados y la determinación de los diferentes parámetros necesarios para posteriores trabajos de rutina (como son material a muestrear, equidistancia entre muestras, cantidad de muestras, tratamiento de las mismas, etc.). Es preferible realizar los estudios de esta naturaleza sobre un yacimiento uranífero o centro de dispersión conocido.

California (Santander)

Teniendo en cuenta que la zona más radiactiva conocida hasta ahora en el país es la región de California (Santander), donde se ha determinado la presencia de minerales de Uranio, se consideró esta área como más propicia para este tipo de investigación.

GEOLOGIA

La región estudiada forma parte del macizo de Santander que, a semejanza con los otros macizos del Oriente Andino colombiano, está constituido de migmatitas precámbricas, de actinitas caledónicas en discordancia sobre ellas, y de rocas eruptivas Hercínicas. (Ver Mapa Geológico, hoja H-13 Ingeominas).

Las migmatitas afloran principalmente al este de la ciudad de Bucaramanga, las ectinitas constituyen la parte más grande de este inmenso cuerpo geológico y las rocas eruptivas Hercínicas se encuentran en macizos, más o menos reducidos al sur de la línea Bucaramanga-Pamplona y cobran importancia hacia el norte de dicha línea (Radelli, 1967).

Las proximidades de California presentan además de las formaciones sedimentarias (Grupo Girón, Cretáceo Transgresivo) principalmente rocas intrusivas Hercínicas y rocas metamórficas más antiguas. Estas rocas intrusivas están representadas especialmente por Granodioritas y Cuarzo Monzonitas atravesadas en parte con pegmatitas de cuarzo, feldespato y mica, con filones y agujas de piritas auroargentíferas. La impregnación radiactiva está claramente definida en los filones, con rumbos predominantes nordeste-suroeste.

Por otra parte, es una área montañosa con abundancia de raudales semicaudalosos y de mucha precipitación.

METODO DE TRABAJO

Fueron tomadas 62 muestras tanto de agua como de aluvión a intervalos de 1 kilómetro, cubriendo un área de 95 km², lo que nos indica una densidad de muestreo de 1,5 muestra por km², durante 12 días de trabajo en el campo. En el sitio de muestreo fue determinada también la temperatura y la conductividad del agua en cuestión.

RESULTADOS OBTENIDOS

El valor medio de la conductancia eléctrica (conductividad normalizada a 18° C) es $16,6 \times 10^{-5} \text{ ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$; valor que corresponde a aguas de bicarbonatos, de baja salinidad, lo cual está de acuerdo con las características geológicas, morfológicas y climáticas de la zona.

La presencia de rocas poco permeables y poco porosas (rocas cristalinas y por lo tanto de una hidrología preferentemente superficial) trae como consecuencia la formación de aguas con baja salinidad.

Existe un valor de conductancia de $71,9 \times 10^{-5} \text{ ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$, lo que nos indica una concentración mayor. Sin embargo, esta muestra está afectada por el laboreo minero unos metros arriba del sitio de muestreo. Esta muestra también presenta un $\text{ph} = 4$ lo que viene a explicar tam-

bién la alta concentración de sales en el agua de este sitio. El ph promedio de esta zona está ubicado entre 6 y 7 lo que nos indica unas condiciones normales de solución del uranio en el agua.

Los resultados analíticos nos indican, contenido de Uranio aluvional desde 0,11 hasta 3,75 ppm, con una muestra de 90,26 ppm. Por su parte las aguas presentan contenidos desde 3 a 3.231 ppm, con muestras que alcanzan valores excepcionales de 23.795 y 37.811 ppm. Se nota una marcada coincidencia en las muestras consideradas anómalas en su contenido de uranio en aluvión y las consideradas anómalas en su contenido de uranio en el agua.

A simple vista se nota una marcada distribución anómala indicadora de la presencia de los filones uraníferos previamente conocidos.

CRITERIOS DE ANOMALIA

Una observación a los histogramas obtenidos (figs. 1, 2, 3) nos indica la presencia de una población homogénea alrededor de una distribución normal. Los valores fuera de ella pueden ser considerados en principio como anómalos.

Para el caso de aguas podemos valernos también de la gráfica N^o 4. Así observamos que podemos reducir el criterio de anomalías a un rango más preciso. Por ejemplo las muestras 236 y 245, 279 y 331 a pesar de que con el primer criterio eran consideradas anómalas debido a su alto contenido de Uranio en el agua, ya pasan a ser normales a causa de su alta conductancia que nos indica que su tenor de Uranio es proporcional a la carga salina que poseen estas aguas.

La observación sobre el terreno viene a corroborar lo anterior, ya que fueron muestras tomadas aguas abajo de una parte donde el laboreo minero y la acumulación de material de boca de mina sobre la quebrada han afectado en grado sumo estas aguas, que en algunos casos alcanzan un $ph = 4$.

Por otra parte, la distribución de altos valores en forma continuada también viene a ayudar el criterio de anomalía (fig. 5-8).

CONCLUSIONES

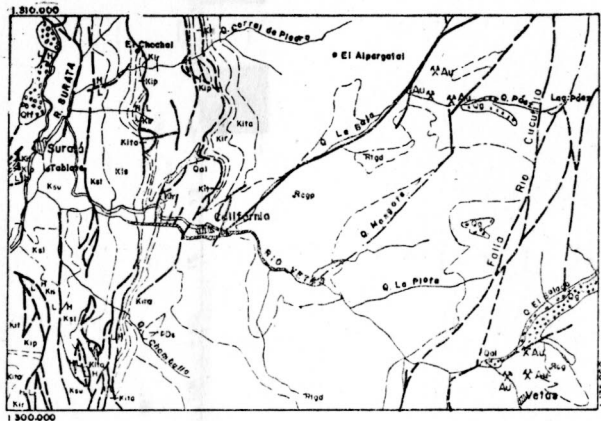
Con los resultados anteriores nos podemos dar claramente cuenta de la bondad de este método, que nos permite cubrir en poco tiempo y con resultados directos grandes áreas, sobre todo aquellas de muy difícil acceso. El método es muy sensible, permite iniciar trabajos de rutina sobre grandes áreas. Por otra parte, el muestreo aluvional sobre un área grande nos facilita la posibilidad de detección de otros minerales especialmente metales pesados.

Este método soluciona también ciertos problemas radiométricos como son:

1. El enmascaramiento producido por la existencia de otros minerales radioactivos.
2. Los recubrimientos superficiales que pueden ocultar la presencia de yacimientos por absorción de los rayos gamma.
3. Casos de desequilibrio radiactivo.

BIBLIOGRAFIA

1. BERTHOLLET, P., GRIMBERT, A., 1958. Dosage de l'Uranium en prospection hydrogéochimique. *Bulletin d'Informations Scientifiques et Techniques du CEA*, N° 2, Paris.
2. DALL'AGLIO, M., TONANI, F., 1960. Metodi di prospezione idrogeochimica, Studi e Ricerca della Divisione Geomineraria, vol. III, pp. 353-386, TBS. 5, fig. 9, Roma.
3. GRIMALDI, F. S., IRVING, M., FLETCHER, M. H. AND TITCOMB, J., 1954. Collected papers of Methods of Analysis for Uranium and Thorium. *Geological Survey Bull.*, 1006, pp. 184, Washington.
4. HAWKES, H. E., 1957. Principles of Geochemical Prospecting. *Geological Survey Bull.*, 1000-F, pp. 355, Washington.
5. HEM, D. J., 1959. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. *Geological Survey Water-Supply Paper*, 1437, pp. 269, Washington.
6. RADELLI, L., 1967. Géologie des Andes Colombiennes. Travaux du Laboratoire de Géologie de la Faculté des Sciences de Grenoble, *Mémoires* N° 6, pp. 470, Grenoble.
7. RANKAMA, K., SAHAMA, TH. G., 1962. *Geoquímica*. Editorial Aguilar, pp. 862, Málaga.



1 300.000

ROCAS ESTRATIFICADAS

CUATERNARIO
Qqj
ALUVION
Qqk
DEPOSITO GLACIARIO

CRETACEO

K10

FORMACION UMIR

Lutita blanca, gris oscura o gris verdosa, en capas delgadas limoniticas. Muebles de carbón en la parte superior.

K11

FORMACION LA LUNA

Miembro Ocotlán: lutita negra, dura, calcárea, en capas delgadas de chert negro y concreciones de calcita con conchitos; capas frías en la parte inferior.

Miembro Pánuco: lutita gris o negra, calcárea.

Miembro Saldaña: lutita negra, dura, calcárea, en pocas capas delgadas de calcita negra, lutita y concreciones pirriticas.

K12

FORMACION SEMITI

Lutita gris oscura, calcárea

K13

FORMACION TABLAZO

Caliza gris, o arena o arcillosa, fosilifera; arenisca de grano fino y lutita gris.

K14

FORMACION PAJA

Lutita negra, blanda, en capas delgadas.

K15

FORMACION ROSA BLANCA

Caliza gris oscura, masiva fosilifera; lutita gris oscura.

K16

FORMACION TAMBOR

Parte superior: arenisca cuarzosas, con capas conglomeraticas.
 Parte inferior: limolita y arenisca parda roja.

ROCAS IGNEAS

TRIASICO — JURASICO

JRcgp

Cuarzo monzonita, opilita y perrito

RTgd

TONALITA Y GRANODIORITA

ROCAS METAMORFICAS

PRE-DEVONIANO

pDdb

Paranesis y pocas esquistos; metamorfismo de alto grado, localmente con masas pequeñas de ortonesis.

ESCALA



NOTA: TOMADO DEL CUADRANGULO N-13 INGEOMINAS.

URANIO EN ALUVION — LA BAJA — VETAS

$n = 49$
 $\bar{x} = 3,55$
 $\sigma = 4,45$

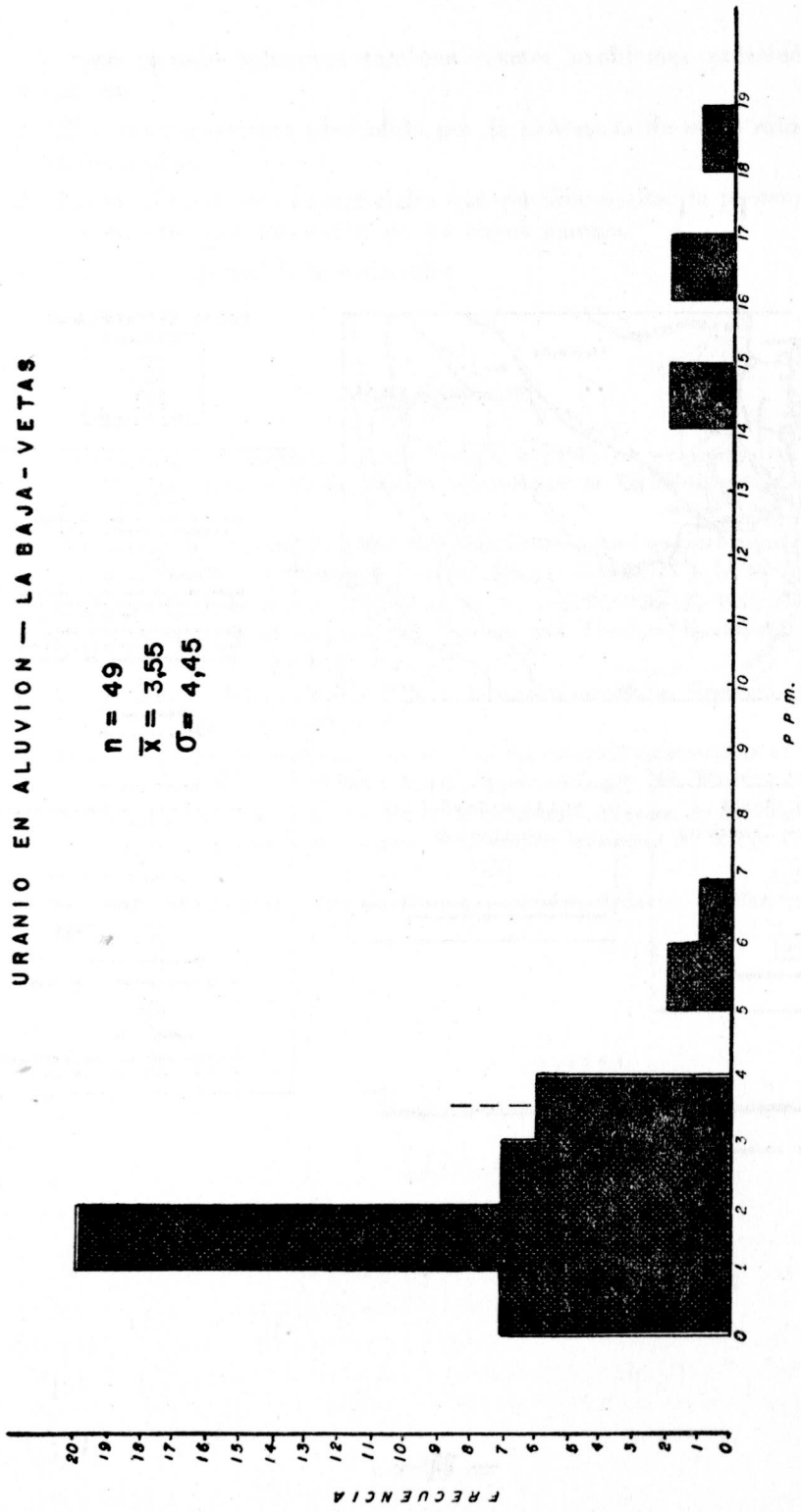


FIGURA - 1

URANIO EN ALUVION — LA BAJA

$n = 200$
 $\bar{x} = 4,60$
 $\sigma = 5,80$

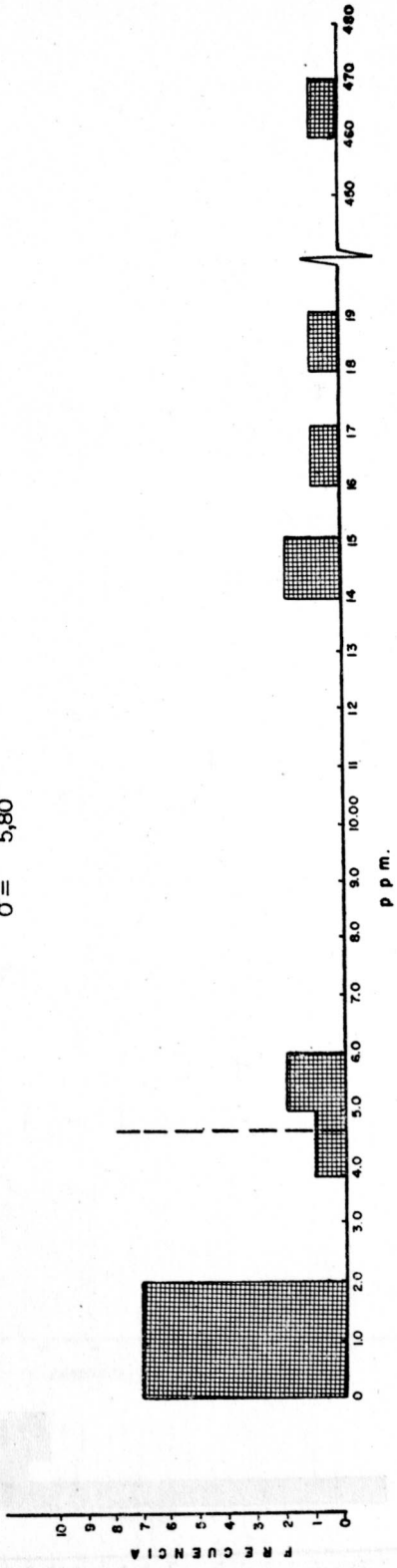


FIGURA-2

URANIO EN EL AGUA — REGION CALIFORNIA-VETAS

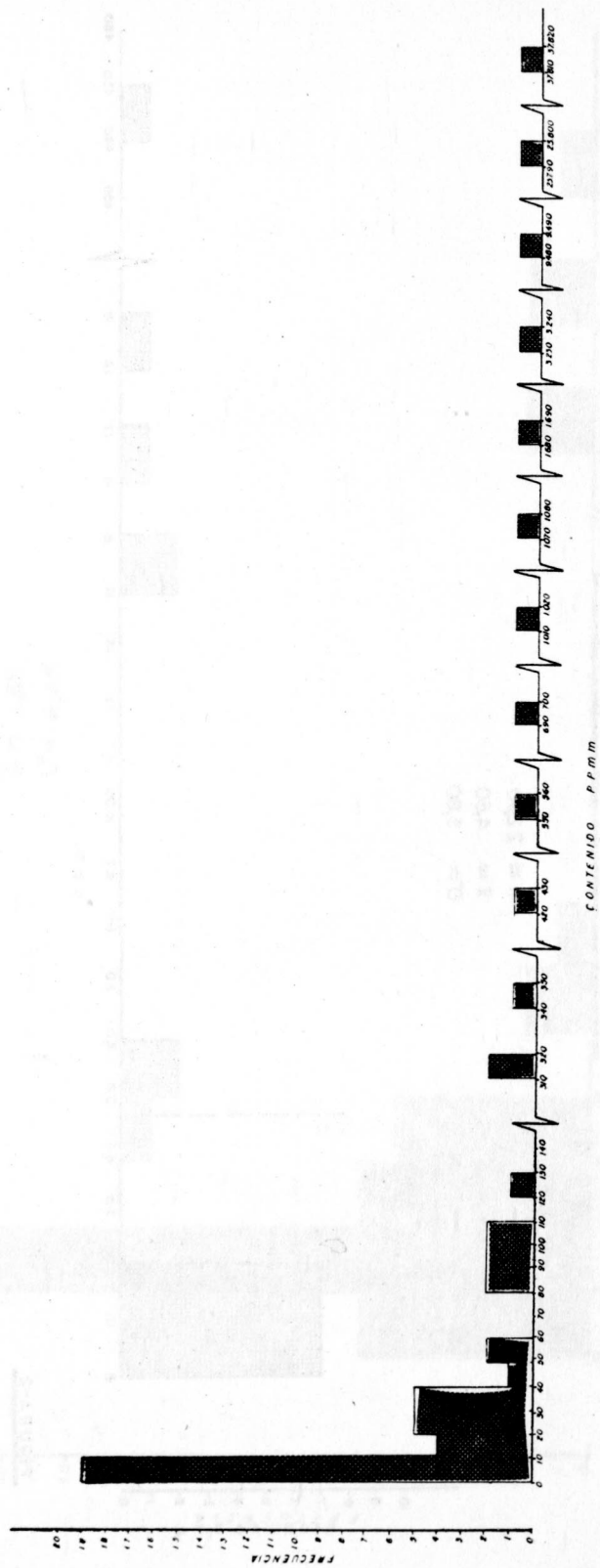
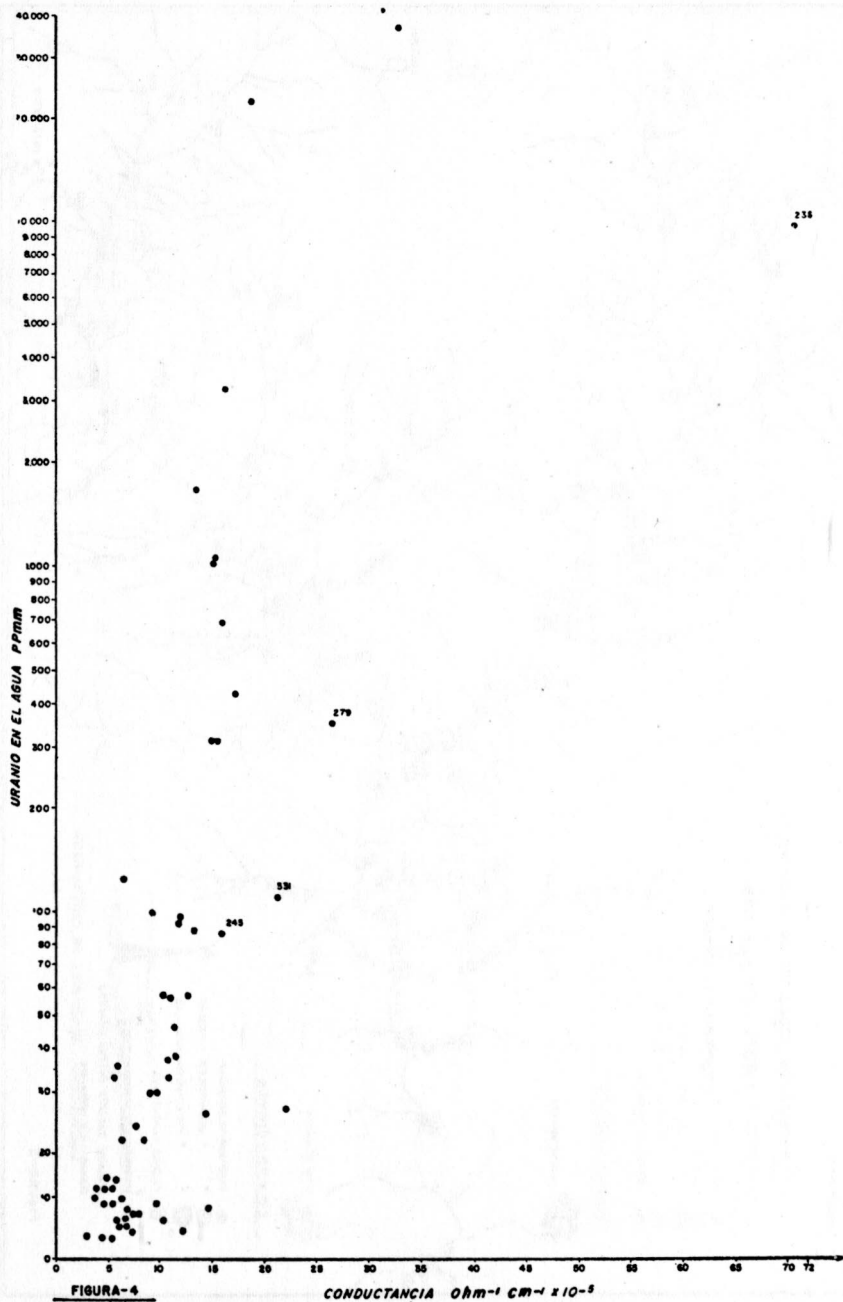


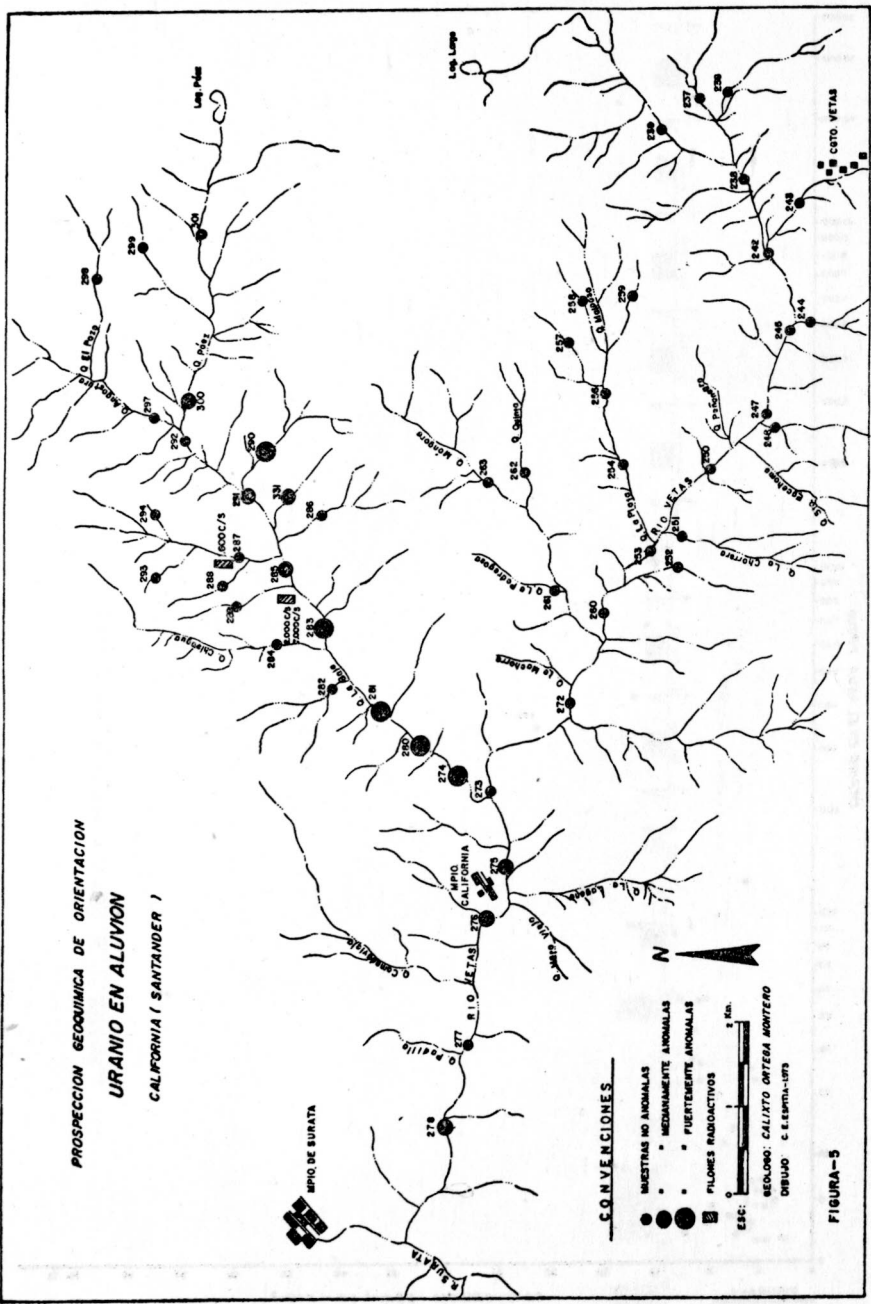
FIGURA 3.



PROSPECCION GEOQUIMICA DE ORIENTACION

URANIO EN ALUVION

CALIFORNIA (SANTANDER)



CONVENCIONES

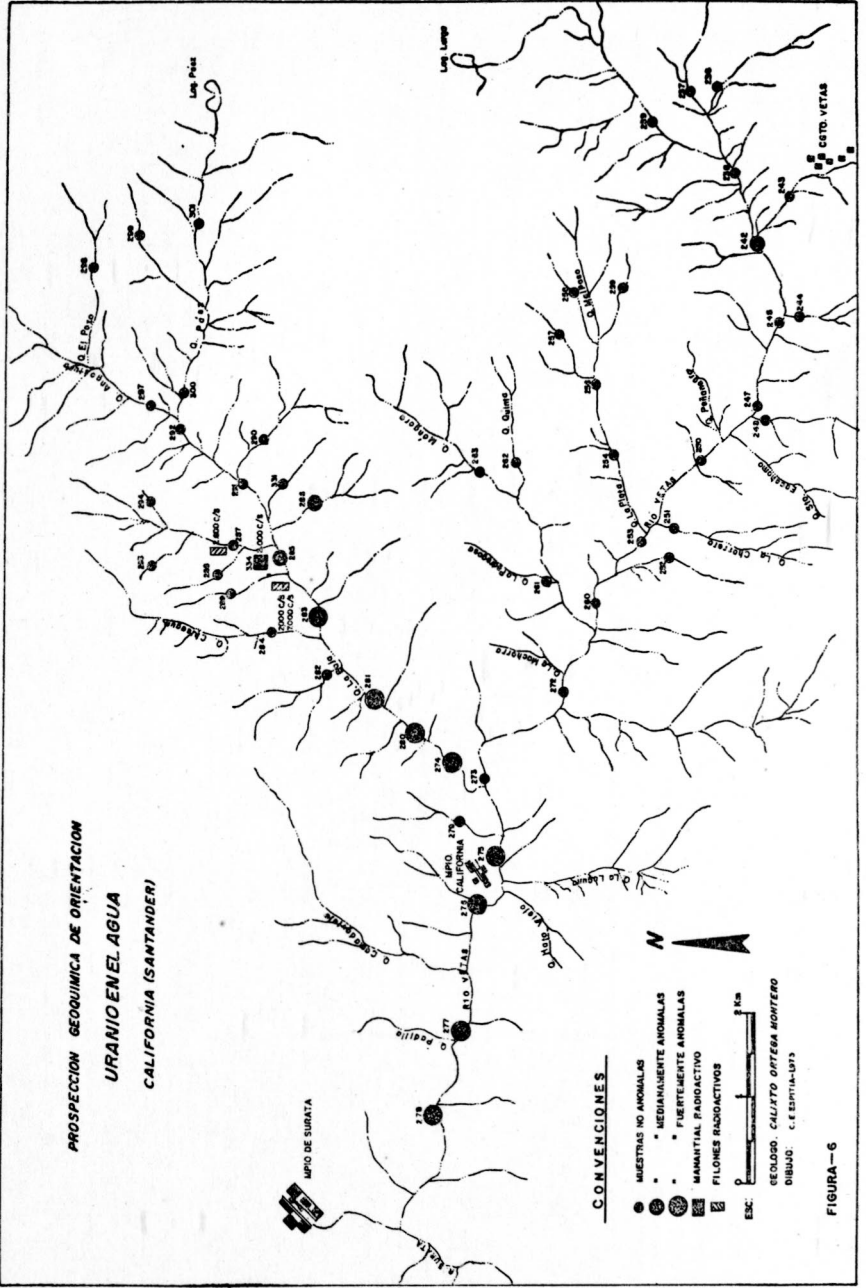
- MUESTRAS NO ANOMALAS
- MEDIANAMENTE ANOMALAS
- ◐ FUERTEMENTE ANOMALAS
- ◑ FILONES RADIOACTIVOS

ESC: 1 Km.

SEDLONO: CALIXTO ORTEGA MONTERO
 DIBUJO C. LEONDA-1973

FIGURA-5

PROSPECCION GEOQUIMICA DE ORIENTACION
 URANIO EN EL AGUA
 CALIFORNIA (SANTANDER)



- CONVENCIONES**
- MUESTRAS NO ANOMALAS
 - MEDIANAMENTE ANOMALAS
 - FUERTEMENTE ANOMALAS
 - MANANTIAL RADIOACTIVO
 - ▨ FILONES RADIOACTIVOS
- ES: 5 km
 DISEÑO: CALIFTO ORTEGA MONTERO
 DIBUJO: C. ESPINOSA-LUYS

FIGURA-6