

APLICACION DE ISOTOPOS AMBIENTALES EN LOS ALREDEDORES

DEL RIO FUERTE, ESTADO DE SINALOA.

POR: Ing. Juan Manuel Lesser I.

R E S U M E N

En la porción norte de la planicie costera de Sinaloa, el agua del Río Fuerte es controlada y distribuida para el riego de la región. No obstante la gran cantidad de agua superficial existente, la creciente demanda ha obligado a que se recurra a la obtención de agua subterránea. Con el objeto de complementar el conocimiento sobre el funcionamiento geohidrológico de los acuíferos y en especial la intercomunicación entre las aguas superficiales del Río Fuerte y las aguas subterráneas propias del acuífero, se llevó a cabo una interpretación basada en isótopos ambientales. Se efectuaron determinaciones de deuterio, oxígeno 18 y tritio, de 58 sitios, a través de las cuales se concluyó que: a) El acuífero es alimentado por las aguas del río y, en menor proporción, por infiltraciones originadas en los flancos del valle. b) El agua salada encontrada en algunos de los pozos perforados sobre la planicie proviene de la disolución de horizontes evaporíticos. c) No se detectó la presencia de intrusión marina.

1.- GENERALIDADES

1.1.- OBJETIVOS.

Los aspectos de mayor interés en lo relacionado al funcionamiento en los acuíferos de la región, son los siguientes: a) La intercomunicación entre aguas superficiales del Río Fuerte y las aguas subterráneas propias del acuífero.- b) El origen de los estratos acuíferos con elevadas salinidades que han sido detectados en perforaciones recientes.

1.2.- LOCALIZACION.

El área en cuestión se localiza en la parte norte de la Planicie Costera del Estado de Sinaloa, entre los paralelos 25°35' y 26°50' de latitud norte y los meridianos 108°20' y 109°30' de longitud oeste. Está limitada al oeste y suroeste por el Océano Pacífico, y al norte por el límite entre los estados de Sonora y Sinaloa. (Figura 1)

En la zona se localiza la Presa Miguel Hidalgo, sobre el Río Fuerte, que da servicio al importante Distrito de Riego No. 75, así como la Presa Josefa Ortiz de Domínguez, sobre el Río Alamos.

1.3.- CLIMATOLOGIA.

El clima dentro del área tratada, varía de la zona costera hacia la sierra. En la zona costera el clima es muy seco y muy cálido, extremoso; en la llanura de El Fuerte el clima es seco, muy cálido y extremoso, y hacia la sierra éste es semiseco, semicálido y muy extremoso. La precipitación varía de 300 mm en la costa a 700 mm hacia las sierras, con un promedio de 550 mm para toda el área.

Por lo que se refiere a temperatura, ésta tiene máximos de 31°C para los meses de junio y julio, y mínimos de 17°C para los meses de diciembre y enero. El promedio anual es de 23.5°C.

1.4.- GEOLOGIA.

La región se ubica dentro de la planicie costera del Estado de Sinaloa y el límite oeste de la Sierra Madre Occidental. La planicie costera está caracterizada por ser una amplia llanura limitada por el Océano Pacífico al suroeste y por la Sierra Madre Occidental al este, y está constituida por materiales clásticos, principalmente fluviales y costeros. La Sierra Madre Occidental, tiene formas abruptas esencialmente de origen ígneo.

En la región existen rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas.

Las rocas sedimentarias consisten principalmente de depósitos fluviales, aluviales, deltáicos y costeros, formados durante el Terciario y Cuaternario. En menor proporción se tienen depósitos sedimentarios marinos del Cretácico. Entre los sedimentos fluviales se encuentran depósitos de llanura de inundación, constituidos por gravas, arenas, limos y arcillas del Cuaternario, los cuales se localizan a lo largo del cauce del Río Fuerte. Los sedimentos aluviales corresponden a depósitos de talud y abanicos aluviales formados por gravas, arenas y limos del Cuaternario, así como a conglomerados, areniscas, areniscas tobáceas, gravas y

arenas de edad Terciaria; estos materiales afloran principalmente en los límites entre las Sierras y la Planicie Costera. En ambos márgenes del cauce del Río Fuerte se extienden amplias llanuras, las cuales corresponden a gravas, arenas, limos y arcillas depositados en antiguos deltas y que han sido asignados al Cuaternario. Hacia las líneas de costa se encuentran materiales clásticos que varían en tamaño de gravas a arcillas, que forman estructuras de playas, dunas, manglares, llanuras de inundación intermareas y bermas, las cuales han sido formadas por la acción del oleaje y mareas, en combinación con descargas fluviales, durante el periodo Cuaternario. Por lo que respecta a los sedimentos marinos, estos consisten en calizas con intercalaciones de lutitas y margas, las cuales se presentan en afloramientos aislados, hacia la sierra.

En relación a las rocas ígneas, existen tanto intrusivas como extrusivas. Las intrusivas son en su mayoría granitos, granodioritas, monzonitas y tonalitas, como facies principales de un gran batolito que aflora en los Estados de Sonora y Sinaloa, al cual se le han determinado edades radiométricas de 40 a 100 millones de años; afloran también intrusivos Paleozóicos que cortan exclusivamente la secuencia metasedimentaria de dicho periodo, e intrusivos básicos que se emplazaron durante el Terciario Superior. Las rocas volcánicas consisten en riolitas, andesitas, ignimbritas riolíticas y tobas vulcano-clásticas, las cuales constituyen las sierras; se presentan en espesores de hasta 4,000 metros y han sido divididas en 7 unidades de acuerdo a su composición y posición estratigráfica, 6 de ellas pertenecientes al Terciario y una al Cuaternario.

Por lo que se refiere a las rocas metamórficas, éstas consisten de gneises, esquistos, pizarras, cuarcitas y calizas con bajo grado de metamorfismo, las cuales fueron originadas tanto por metamorfismo regional, como de contacto en las aureolas producidas por los intrusivos. Se presentan en afloramientos aislados hacia las sierras.

1.5.- HIDROGEOLOGIA.

La región presenta rocas tanto permeables como impermeables. Las rocas permeables corresponden a los sedimentos clásticos de origen fluvial, deltáico y costero, mientras que las impermeables consisten en rocas volcánicas, intrusivos, rocas metamórficas y sedimentarias marinas.

Los materiales que forman los acuíferos de la zona, corresponden a gravas, arenas y arcillas de la llanura de inundación del Río El Fuerte, así como los sedimentos clásticos de la llanura deltáica que se extienden principalmente hacia la margen izquierda del Río El Fuerte y que forman una extensa planicie.

1.6 HIDROLOGIA SUPERFICIAL.

El Río El Fuerte constituye la principal corriente superficial de la zona. Este, se forma en la Sierra Madre Occidental y corre en dirección general

noreste-suroeste; a la altura del poblado El Fuerte sus aguas son controladas mediante la presa Miguel Hidalgo. Aguas abajo estos escurrimientos son derivados a canales y utilizados para el riego de gran parte de la llanura costera a ambos lados del río. Hasta la presa Miguel Hidalgo drena un área de 29,427 Km².

1.7. HIDROLOGIA SUBTERRANEA.

Los sedimentos que forman la llanura costera en la zona del Río Fuerte, constituyen un acuífero cuya permeabilidad se considera que va de media a alta, y que es alimentado por parte de la lluvia que escurre de la sierra hacia la planicie y que se infiltra a dichos sedimentos. Otra recarga al acuífero lo constituye el propio Río Fuerte, que aporta agua en ocasiones, aunque en otras sirve de dren. La extracción de agua por medio de los pozos y la evaporación, constituyen las otras descargas del acuífero.

2.- SELECCION DE SITIOS DE MUESTREO.

La mayor parte de la extracción de agua subterránea de la zona de El Fuerte se ubica sobre las márgenes del río, en lo que puede considerarse como su llanura de inundación. Durante la perforación de pozos se ha encontrado que un gran número de ellos contienen elevadas concentraciones de sales. El origen de estas sales, así como la intercomunicación entre el agua superficial y la subterránea, fueron los principales objetivos del presente trabajo, por lo cual la selección de los sitios para muestreo se llevó a cabo con esos fines.

Primeramente, se obtuvo una muestra de agua del mar con el objeto de identificar su contenido isotópico, ya que ésta puede ser una fuente de origen de sales. Para calibrar el agua de lluvia de reciente infiltración que no haya sufrido efectos notables de evaporación, se obtuvieron cuatro muestras, localizadas aguas arriba de la presa Miguel Hidalgo. Dos de ellas corresponden a agua superficial de río, a la altura de los poblados de Agua Caliente y Choix y las dos restantes corresponden a norias ubicadas al este de la presa, las cuales aparentemente no han estado sujetas a efectos notables de evaporación. (Figura 1)

Para identificar el grado de fraccionamiento isotópico que ha sufrido el agua superficial, se obtuvieron 4 muestras de agua de la presa Josefa Ortiz de Domínguez, en dos sitios diferentes y a profundidades de 2 a 5 m. Debido a problemas de campo no fue posible obtener muestras de la presa Miguel Hidalgo.

Para comprobar la íntima relación hidrológica entre el agua del río y del acuífero en las márgenes del mismo, se obtuvo una muestra de la noria 11-D, de la cual se tienen datos hidrológicos para el periodo enero a diciembre de 1978.

La parte alta del río, entre la presa Miguel Hidalgo y San Blas, corresponde a un valle angosto, alargado, en el cual se obtuvieron 19 muestras de

agua, repartidas en tres secciones con el objeto de conocer la variación isotópica de las márgenes del valle hacia el río y determinar la influencia de las aguas superficiales hacia el acuífero, y/o la magnitud de las aportaciones laterales de agua subterránea provenientes de las sierras hacia el acuífero del valle y el río que lo corta.

En la llanura del Río El Fuerte, al norte y este de Los Mochis se obtuvieron 6 muestras de agua de pozos salobres, con el objeto de identificar su fuente de origen; determinar si provienen de una intrusión salina de agua de mar; determinar si es agua fósil o agua reciente que ha disuelto horizontes de sedimentos evaporíticos y conocer si la salinidad corresponde a varias fuentes y a varios eventos geológicos o bien si corresponde a uno solo. Se hace notar que no fue posible muestrear algunos de los pozos con mayores contenidos salinos debido a que se encontraban recién equipados, pero aún sin energía eléctrica. En esta misma zona se obtuvieron 22 muestras de agua correspondientes a igual número de aprovechamientos de agua subterránea, repartidas en tres secciones aproximadamente perpendiculares al curso del Río El Fuerte, con el objeto de conocer la relación entre las aguas superficiales y las subterráneas, así como para obtener una base de diferenciación y calibración de aguas de buena calidad para poder apoyar la interpretación de los orígenes del agua con elevadas salinidades.

En total se seleccionaron 58 sitios de muestreo para efectuar análisis químicos y de los isótopos ambientales oxígeno 18 y deuterio. A 10 de ellas se les determinó también su contenido de tritio. De éstas, 4 corresponden a norias localizadas en una de las secciones ubicadas entre El Fuerte y San Blas, las cuales tienen por objeto complementar el conocimiento hidrogeológico obtenido mediante las otras determinaciones. Dos muestras corresponden a pozos con agua salobre ubicados al norte y este de Los Mochis, con lo cual se pretende conocer la edad relativa del agua y dictaminar si corresponde a agua antigua o moderna, o de varios periodos geológicos. Las 4 muestras restantes son de aprovechamientos de agua de buena calidad, situados cerca de los de agua salobre, los cuales se utilizan de forma comparativa. Estas muestras auxilian también a la interpretación hidrogeológica.

Las muestras obtenidas fueron enviadas para su análisis a laboratorios especializados.

Las determinaciones isotópicas fueron llevadas a cabo por el Centro de Estudios Nucleares de Saclay, Francia (Centre D'Estudes Nucleaires de Saclay), el cual cuenta con espectrómetro de masas completamente automatizado que trabaja integrado a una computadora. (Tabla 2)

3. ANALISIS QUIMICOS.

De los 58 sitios seleccionados para análisis isotópicos fue obtenida una muestra más de agua, la cual fue remitida al laboratorio para efectuarle un análisis químico. Presentan concentraciones muy variadas, que van desde 110 hasta 24,045 ppm de sólidos totales disueltos.

Las concentraciones más bajas, del orden de 110 a 300 ppm, corresponden al agua superficial almacenada en las presas, así como a algunos aprovechamientos que captaron agua de lluvia días antes del muestreo. Las concentraciones entre 300 y 1,000 ppm corresponden a la concentración encontrada en el acuífero - en la mayor parte de las muestras, a excepción de zonas locales en donde se registran hasta 15,000 ppm, lo cual es ocasionado por condiciones locales. La muestra con 24,045 ppm de sales fue tomada en el mar, a la altura de Topolobampo.

Por lo que se refiere a los diferentes índices analizados, se calculó su promedio aritmético sin tomar en cuenta el agua de mar y el pozo 150-I que contiene 15,000 ppm de S.T.D. Estos promedios junto con el valor mínimo y máximo encontrados dan una idea de la cantidad y tipo de sales encontradas y se muestran a continuación.

C O N C E N T R A C I O N						
	Mínima		Máxima		Promedio	
	ppm	me/l	ppm	me/l	ppm	me/l
Calcio	12	0.59	608	30.33	110	5.52
Magnesio	1	0.08	199	16.36	31	2.57
Sodio	0	0	2626	114.26	136	5.91
Bicarbonatos	139	2.27	637	10.44	350	5.74
Cloruros	13	0.36	2928	85.59	181	5.11
Sulfatos	1	0.02	1500	31.23	152	3.17
Conductividad Eléctrica.	205		12000		1250	
Dureza Total	60		1840		413	
Sólidos Totales	110		8025		954	

5.- INTERPRETACION ISOTOPICA.

5.1.- INTRODUCCION.

En las últimas décadas el conocimiento y aplicación de isótopos a la hidrología ha ido en aumento. Los principales isótopos utilizados como auxilia

res para obtener un mejor y más completo conocimiento del funcionamiento de los - acuíferos subterráneos son los isótopos estables deuterio y oxígeno 18, así como los isótopos radioactivos tritio y carbono 14. Excepto el carbono 14, el resto de los isótopos mencionados tienen la ventaja de que forman parte de la molécula del agua.

El deuterio es un isótopo del hidrógeno. Se identifica con la sigla "D" y sus concentraciones son expresadas en relación al elemento común o sea al hidrógeno (H) y en unidades δ como sigue:

$$\delta^D = \frac{(D/H) \text{ MUESTRA} - (D/H) \text{ SMOW}}{(D/H) \text{ SMOW}} \times 1000$$

Donde D/H SMOW es la concentración media del agua de mar.

El oxígeno 18 es un isótopo del oxígeno, se identifica con la sigla $\delta^{18}O$ y sus concentraciones se expresan en relación al elemento común, o sea al oxígeno (^{16}O) y en unidades como sigue:

$$\delta^{18}O = \frac{(^{18}O/^{16}O) \text{ MUESTRA} - (^{18}O/^{16}O) \text{ SMOW}}{(^{18}O/^{16}O) \text{ SMOW}} \times 1000$$

Estos isótopos estables son sensibles a cambios de temperatura y presión, lo cual ocasiona un fraccionamiento isotópico. Por ello el agua sujeta a evaporación, principalmente en cuerpos estancados como presas o lagos, sufre un fuerte fraccionamiento que ocasiona altas concentraciones de isótopos. Por el mismo fenómeno, el agua precipitada a diferentes alturas presenta contenidos isotópicos diferentes. Estos aspectos o propiedades de los isótopos estables δ^D y $\delta^{18}O$ son aplicados e interpretados para diferenciar aguas con diferentes orígenes o que ha estado sujeta a ciertos procesos.

Por lo que respecta a los isótopos radioactivos el tritio es un isótopo del hidrógeno y forma parte de la molécula del agua. El carbono 14 es un isótopo del elemento carbono. Su decaimiento radioactivo está en función del tiempo y es cuantificable. En base a su detección, es factible conocer el tiempo transcurrido desde que el agua se precipitó sobre la superficie. El decaimiento del tritio es relativamente rápido, siendo posible datar aguas hasta con 50 años. Las aguas con mayor tiempo de infiltración, entre 50 y 30,000 años deben ser datadas por medio del carbono 14.

En el presente trabajo se consideró conveniente analizar algunas muestras respecto a su contenido de tritio y dependiendo de los resultados se establecería la conveniencia de programar determinaciones de carbono 14.

Existen dos fuentes de tritio. La primera corresponde al tritio natural, el cual es producido por la interacción de radiaciones cósmicas en la atmósfera. El segundo tipo es el tritio considerado como artificial, ya que es el producido mediante explosiones nucleares. El contenido de tritio en el agua de lluvia antes del año de 1948, variaba entre 5 y 10 U.T. Posteriormente y debido a explosiones nucleares de esa época, el contenido de tritio se incrementó, llegando a detectarse en los años de 1963 a 1967 los valores más altos, los cuales fueron del orden de 200 U.T.

Actualmente se tienen concentraciones del orden de 20 U.T.

Tomando en cuenta lo anterior, se puede afirmar que el agua con menos de 2 U.T., se infiltró hace más de 40 años, por lo cual se denomina "antigua" y el agua con más de 2 U.T. tiene menos de 40 años y se denomina "moderna".

Si el agua tiene concentraciones mayores de 40 U.T., se infiltró entre los años de 1963 y 1967, época en la que se registraron los valores más altos de tritio. Por otra parte, el agua de lluvia infiltrada en los últimos años, presenta contenidos de tritio de alrededor de 20 U.T.

5.2. DEUTERIO Y OXIGENO 18.

Con el objeto de interpretar los resultados de los isótopos estables pesados, se formó una gráfica con estos dos parámetros, la cual se presenta en la figura No. 3. En ella se observa que las muestras obtenidas se distribuyen a lo largo de una recta que corresponde a una línea de precipitación local, caracterizada por la ecuación:

$$\delta D = 6.54 \delta^{18}O - 2.99$$

La distribución de las concentraciones isotópicas en dicha gráfica, a lo largo de una línea meteórica, indican que están influidas principalmente por efectos de precipitación, con una distribución muy amplia, de 3.5% de oxígeno 18, ocasionada por la presencia de muestras de agua infiltradas a alturas variables.

Para simplificar la interpretación se formaron grupos de muestras de acuerdo a su distribución en el campo.

AGUA DE PRESAS.

Al efectuar los recorridos de campo se encontraron dificultades para la obtención de muestras de agua representativas de la presa Miguel Hidalgo, por lo cual no se cuenta con resultados de isótopos estables pesados de ésta. Se obtuvo una muestra del Río Fuerte (E-4), a la altura del poblado de Agua Caliente, lo cual se ha considerado como representativa promedio de la cuenca de captación de la presa Miguel Hidalgo, aunque se hace notar que ésta es una decisión arbitraria, ya que se está tomando en cuenta un solo valor, el cual puede estar sujeto a errores. Esta muestra tiene un contenido de

$$\delta^{18}O = -6.75$$

Por otro lado se obtuvieron 4 muestras en la presa Josefa Ortíz de Domínguez, las cuales son una mezcla de las aguas de las cuencas de las dos presas, ya que de la Miguel Hidalgo son derivados volúmenes importantes hacia la Josefa Ortíz de Domínguez. El agua de esta última presa presenta un contenido de $\delta^{18}\text{O} = -4.6\text{‰}$ valor alto con respecto al resto de las muestras analizadas. (Figura 3 y 11 A)

La diferencia entre los dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ mencionados es alto, y se sugiere que es ocasionado por efectos de altitud, ya que la presa Miguel Hidalgo tiene una altura promedio de recarga considerada en 1,200 msnm, mientras que la de la presa Josefa Ortíz de Domínguez es de alrededor de 500 msnm.

Debido a que la presa Josefa Ortíz de Domínguez recibe agua de la presa Miguel Hidalgo, siendo por tanto poco representativa de su cuenca, así como el grado de error que presenta el valor promedio obtenido para la presa Miguel Hidalgo, no es factible hacer un análisis cuantitativo de efectos de altitud. Más adelante se tratará éste de modo cualitativo.

ZONA CHOIX.

En esta zona se obtuvieron las muestras Nos. E-1, E-2 y E-3.

Estas corresponden a aguas de los afluentes del Río Fuerte, infiltrada en las estribaciones de la sierra, con un valor de $\delta^{18}\text{O} = -5.55$, o sea 1.2 unidades menor que la muestra E-4 considerada como el promedio de la Cuenca Alta del Río Fuerte. De lo anterior se deduce que la zona de recarga de los afluentes-muestreados en E-1, E-2 y E-3, se ubica alrededor de 600 m más bajo que el promedio del agua de la presa. (Figuras 3 y 11A)

SECCION 1.

A 22 km aguas abajo de la presa Miguel Hidalgo se obtuvieron 5 muestras a lo largo de la sección perpendicular al río. Estas son las que presentan un mayor contenido de isótopos estables pesados. Su distribución en la gráfica indica que las muestras 12-D y 83-D, las cuales presentan los contenidos isotópicos más altos, corresponden a las zonas más alejadas del río. Conforme disminuye la distancia a éste, (muestras 10-D y 11-D) el contenido isotópico es menor. - Esto indica que el agua subterránea cercana al río presenta mezcla con agua de éste, mientras que la más alejada corresponde a agua proveniente de los afluentes laterales. (Figura 4)

Las muestras de este grupo presentan una regresión lineal caracterizada por la ecuación:

$$\delta D = 5.64 \delta^{18}\text{O} - 9.27$$

coeficiente de determinación

$$r^2 = 0.89$$

Sin tomar en cuenta la muestra 83, la cual posiblemente tenga efectos de evaporación, la regresión sería:

$$\delta D = 6.28 \delta^{18}O - 5.83$$

coeficiente de determinación

$$r^2 = 0.99$$

Observándose que muestra un coeficiente de determinación más aceptable.

SECCION 2.

Se localiza aproximadamente a 30 km aguas abajo de la presa Miguel Hidalgo. Se muestrearon los 8 aprovechamientos siguientes: 97-D, 99'-D, 40-I, 87-I, 40'-I, 92-I, 93-I y 94-I.

En la margen izquierda se repite el fenómeno observado en la sección 1, o sea que las muestras más cercanas al río, las cuales están influenciadas -- por éste, presentan un menor contenido isotópico, mientras que en las más alejadas, cuya agua proviene de las sierras locales adyacentes, los valores de δD y $\delta^{18}O$, son más altos.

En la gráfica de la figura 5 se ilustra el cambio gradual en concentración isotópica que tienen estas muestras en relación con su distancia al río, cambio que corresponde a diferentes grados de mezcla de agua de la presa con aportes laterales.

La regresión lineal para esta sección es:

$$\delta D = 8.84 \delta^{18}O + 11.66$$

$$r^2 = 0.97$$

Las muestras de la margen derecha tienen menor contenido isotópico que el resto y muy similar al E-4, por lo cual se infiere que tienen una mayor influencia del agua del río proveniente de la presa.

Por lo que respecta a su concentración de tritio se tienen valores muy variables que van de 0.5 a 24 U.T., que corresponden tanto a agua "antigua" como a agua considerada como "moderna".

SECCION 3.

A aproximadamente 10 kilómetros aguas arriba del poblado de San -

Blas se obtuvieron 3 muestras de agua sobre la margen derecha del río y 4 sobre la margen izquierda.

En lo que respecta a las muestras 43-I, 99-I, 58-I y 101-I, se observa un efecto similar al encontrado sobre la margen izquierda de las secciones anteriores. El alineamiento en la gráfica de la figura 6, coincide con su distribución en el campo.

Las muestras 62-D, 65-D y 110-D tienen un contenido isotópico menor, de donde se deduce que su zona de recarga se encuentra más alta que la de las muestras de la margen izquierda, o sea que corresponden a agua de río.

Las muestras se desplazan desde el punto E-4, representativo del agua de la presa, hasta los puntos 58 y 101, indicando una mezcla paulatina del agua del río con los aportes laterales al acuífero.

La regresión lineal δD y $\delta^{18}O$ de esta sección es:

$$\delta D = 8.96 \delta^{18}O + 12.9$$

$$r^2 = 0.95$$

En el tramo comprendido por las tres secciones tratadas se concluye que el río alimenta al acuífero en las margenes del cauce y que existen aportes laterales de agua infiltrada a menor altura que el agua de la presa.

El flujo subterráneo del agua proveniente de las sierras laterales que circula hacia el río es más notable en la margen izquierda, debido a que el área de captación de la cuenca hidrológica de esta margen es mayor que el área de la margen derecha.

Aguas abajo de San Blas, en donde el Río Fuerte corre a través de la planicie costera, en dirección al mar, se obtuvieron muestras para análisis isotópicos, las cuales se agruparon en tres zonas denominadas secciones 4, 5 y 6.

SECCION 4.

Esta sección está representada por los aprovechamientos siguientes:

Margen Derecha	Margen Izquierda
136-D y	147-I, 173-I, 166-I
137-D	150-I, 184-I y 169-I

Tanto en el plano de localización como en la gráfica $\delta D - \delta^{18}O$ de la figura No. 7 se observa el alineamiento siguiente:

150-I 147-I 166-I 184-I

Esto sugiere que los pozos 150-I y 147-I corresponden a agua de la presa proveniente de los canales situados a corta distancia de ellos. Este efecto disminuye hacia 166-I y 184-I posiblemente por efectos de mezcla con otras aguas.

La regresión lineal de las muestras de esta sección es:

$$\delta D = 6.55 \delta^{18}O - 4.3$$

$$r^2 = 0.97$$

SECCION 5.

En la zona localizada entre la Ciudad de Los Mochis y el Río Fuerte se muestrearon 5 pozos, los cuales se agrupan y describen bajo la denominación de Sección 5. (Figura 8.)

Su contenido de isótopos estables pesados es similar al resto de las muestras de la planicie de donde se deduce que no obstante que son los más distantes del río, tienen una fuente común de recarga.

La regresión lineal del conjunto es la siguiente:

$$\delta D = 4.53 \delta^{18}O - 16.73$$

$$r^2 = 0.95$$

Se determinó el contenido de tritio de la muestra 224-I, obteniéndose un valor de 27.7 ± 1.2 U.T., que corresponde a agua que se infiltró recientemente.

Este pozo presenta un alto contenido salino, del orden de 3,000 ppm de sólidos totales disueltos.

El alto contenido de tritio encontrado descarta la posibilidad de que corresponda a agua fósil, por lo cual se deduce que la fuente de sales son sedimentos evaporíticos que se encuentran en el subsuelo y que son disueltos por el agua subterránea.

SECCION 6.

En los alrededores del Poblado de Ahome se obtuvieron 15 muestras de agua, 5 en la margen izquierda del río y 10 sobre la margen derecha.

En la gráfica de la figura 9 se observa que la mayor parte tiene un valor de $\delta^{18}O = -7.1 \pm 0.3$ ‰, valor cercano al del agua de la presa, de donde se deduce que esta zona está alimentada por agua superficial del río y canales de riego.

Se encuentran algunas muestras como las Nos. 162-D, 163'-D, 164'-D y 148'-D que tienen un contenido de $\delta^{18}O$ de -5.5 ± 0.5 , las cuales deben estar influenciadas por agua infiltrada en las sierras de los alrededores, a una altura menor que el agua de río.

La regresión lineal de los aprovechamientos de esta sección es:

$$\delta D = 6.92 \delta^{18}O - 0.11$$

$$r^2 = 0.92$$

A las muestras 163'-D, 159-D y 187-I se les determinó su contenido de tritio. La muestra 159-D tiene 17.0 ± 1.0 U.T., por lo cual se considera agua reciente. Las otras muestras presentan un contenido de alrededor de 24 U.T., o sea que se infiltraron hace aproximadamente 10 años y han sido catalogadas como aguas "modernas".

5.3. GRAFICA COMPARATIVA.

Con el objeto de comparar los resultados isotópicos de los diferentes grupos tratados, se marcaron sobre la gráfica de la figura 10 los rangos que abarcan cada uno de ellos.

Las secciones S_4 , S_5 y S_6 , ubicadas en la planicie costera, aunque presentan un rango de variación muy amplio se puede generalizar que su contenido de isótopos estables es semejante entre si. Los valores que presentan son bajos, al igual que el punto E-4, considerado como representativo del agua de la presa Miguel Hidalgo, de donde se puede considerar que el agua subterránea de esta zona está en relación con el agua del río, la cual a partir del puerto de San Blas debe de infiltrarse y alimentar al acuífero tanto a partir de su cauce, como de los canales de riego.

El agua de las secciones S_1 , S_2I y S_3I , presentan en comparación, un contenido isotópico mayor, debido a que existe un aporte lateral al acuífero proveniente de las sierras aledañas. En la margen derecha del río, los grupos S_2D y S_3D , indican que están influenciados significativamente por agua del río y que la recarga lateral en esta zona es mínima o nula. Finalmente el agua de la presa Josefa Ortiz de Domínguez, presenta mayor contenido isotópico, debido a que contiene agua infiltrada a menor altura.

5.4.- EFECTO DE ALTITUD.

El agua de lluvia presenta un contenido en isótopos pesados que están en relación con la evaporación e intercambio isotópico que se efectúa en su trayectoria hasta llegar al suelo.

Las muestras obtenidas muestran claros efectos de altitud, por lo cual se procedió a efectuar un análisis con el objeto de determinar grupos de aguas infiltradas a diferentes alturas.

El contenido $\delta^{18}O$ varía entre 0.16 y 0.70 o/oo, por cada 100 m de diferencia en altitud (Latorre, 1978). Debido a que no fue posible en este trabajo conocer el valor exacto para esta región, se intentó trabajar con alturas relativas, para lo cual se infirió un valor de 0.28 o/oo de $\delta^{18}O$ por cada 100 m de diferencia, basado en los siguientes:

El agua de la muestra E-4 representativa de los escurrimientos -

de la cuenca del Río Fuerte hasta la presa, tiene una altura media de recarga de 1,200 msnm, mientras que el agua de la presa Josefina Ortíz de Domínguez, aunque se conoce que contiene aguas mezcladas, tiene una altura promedio de precipitación de 500 m. A partir de las diferencias en altitud y contenido de $\delta^{18}O$, se obtiene un valor de $\delta^{18}O = 0.28 \text{ ‰}$ por cada 100 m de diferencia.

Uno de los valores con mayor altitud, corresponde a la muestra E-4, la cual se ha considerado como representativa de la presa Miguel Hidalgo.

En la figura 11a se graficó la altitud de recarga contra $\delta^{18}O$, de las muestras de la presa y de la Zona de Choix. Los aprovechamientos E-1, E-2 y E-3, tienen una altura de + 430 m más baja que el agua de la cuenca del Río Fuerte, debiendo por lo tanto, corresponder éstas a infiltraciones locales de las sierras adyacentes.

En la sección 1 (figura 11b) las altitudes obtenidas son bajas, de donde se deduce que el agua superficial caracterizada por E-4, no recarga al acuífero en esta zona, o bien su influencia no es apreciable.

En los grupos S_2 y S_3 (figuras 11c y 11d), ubicados aguas arriba de San Blas, se observa que las muestras de la margen derecha tienen una alimentación significativa de agua del río, ya que su efecto de altitud es similar a E-4, mientras que para los sitios de la margen izquierda su distribución, se deduce que corresponden a una mezcla de aguas, tanto del río como de filtraciones laterales que se efectúan a una altura de alrededor de 850 msnm, o sea a aproximadamente 350 m más bajo que la inferida para la presa Miguel Hidalgo.

En la figura 12a, correspondiente a la sección 4, se observa claramente el alineamiento entre los aprovechamientos:

150-I - 147-I - 166-I - 184-I

Ratificando lo expuesto anteriormente, relativo a que los sitios 150 y 147 corresponden a agua de la presa proveniente de los canales situados a corta distancia, la cual al circular hacia el río se va mezclando paulatinamente con otra agua precipitada a menor altura.

Por lo que se refiere a las secciones 5 y 6 (figuras 12b y 12c), al estar situadas en una amplia zona de inundación, presenta tanto aguas típicas de la presa precipitadas a + 1,200 msnm, como aguas de precipitación local (+ 500 msnm) y mezclas de ellas.

5.5.- TRITIO.

Para determinar el tiempo que ha permanecido el agua en el subsuelo, se efectuaron 17 análisis de tritio, cuyos resultados se resúmen a continuación:

MUESTRA No.	GRUPO	TRITIO U.T.	CLASIFICACION
40'-I	S ₂	0.5 ± 0.5	Antigua
87-I	S ₂	21.5 ± 1.0	Moderna
93-I	S ₂	2.6 ± 0.6	Antigua con una porción de agua moderna
147-I	S ₄	21.6 ± 1.0	Moderna
187-I	S ₆	24.9 ± 1.1	Moderna
224-I	S ₅	27.7 ± 1.2	Moderna
99'-D	S ₂	22.7 ± 1.8	Moderna
159-D	S ₆	17.0 ± 1.0	Moderna
163'-D	S ₆	23.8 ± 1.2	Moderna

Las muestras 40'-I y 3-I, correspondientes a la sección 2, presentan un contenido muy bajo de tritio de donde se deduce que corresponden a - - aguas de más de 40 años de haberse infiltrado, por lo tanto los aportes laterales que recibe el acuífero, deben de ser pobres y la renovación del sistema muy lenta.

El resto de las muestras tienen un contenido de entre 17 y 27 U.T. lo cual significa que se infiltraron en épocas modernas. Al no encontrarse valores mayores de 50 U.T., se descarta la posibilidad de que el agua se haya infiltrado durante la época de explosiones nucleares. Se infiere que ésta es agua con menos de 12 años de infiltrada.

Uno de los objetivos del trabajo fue el determinar si el agua salada encontrada en algunos de los pozos, correspondía a cuerpo de agua fósil. Para ello se obtuvo y analizó el agua de los pozos 147-I y 224-I, que presentan - concentraciones de alrededor de 3,000 ppm de sales. Estos tienen un contenido de tritio de 21.6 ± 1.0 y 27.7 ± 1.2 U.T., y se clasificaron como agua moderna in--filtrada hace menos de 12 años, por lo cual se deduce que ésta no corresponde a agua fósil.

6. ORIGEN DE LA SALINIDAD DEL AGUA.

En las perforaciones para explotación de agua subterránea que en los últimos años ha llevado a cabo la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos en la zona de El Fuerte, se han encontrado varios pozos que extraen agua - con más de 10,000 ppm de sales disueltas, localizados entre otros pozos con salinidades menores de 600 ppm.

Esto hizo pensar en la posible existencia de cuerpos de agua-fósil, atrapada entre los sedimentos, durante su formación.

Para estudiar las causas de esta alta salinidad, se plantearon - las hipótesis siguientes:

- 1) Existencia de agua fósil.
- 2) Intrusión Salina.
- 3) Presencia de evaporitas.
- 4) Combinación de los efectos anteriormente mencionados.

Con los resultados de los análisis isotópicos y el conocimiento hidrogeológico de la región, se concluyó lo siguiente:

1.- Agua Fósil.- La presencia de este tipo de agua y como su nombre lo indica, implicaría la existencia de agua antigua, con cientos de años de infiltrada. Los resultados de los análisis de tritio muestran que los aprovechamientos con agua salada tiene una edad aproximada de 12 años, de donde se deduce que no corresponde a agua fósil.

2.- Intrusión Salina.- Esta hipótesis se descarta por:

- a) La gran distancia entre los pozos y la línea de costa.
- b) La extracción de agua subterránea es mínima.
- c) Los volúmenes de agua subterránea que fluyen al mar son grandes.
- d) Los datos geoquímicos ratifican la ausencia de efectos de intrusión salina.

Para que existiera intrusión salina sería necesario invertir el gradiente del acuífero, abatiendo los niveles, efecto que no se presenta en la zona.

3.- Presencia de Evaporitas.- El hecho de que el agua tenga una edad denominada "moderna", tanto en los aprovechamientos que presentan bajos contenidos salinos, como en los de agua salada, sugiere que existen zonas locales con horizontes evaporíticos, los cuales son disueltos por el agua al circular a través de ellos.

C O N C L U S I O N E S

1.- El agua subterránea entre El Fuerte y San Blas, proviene principalmente de la infiltración del agua del río y en menor proporción de aportaciones subterráneas laterales provenientes de las sierras locales adyacentes.

- 2.- Las zonas cercanas al cauce son las que presentan mayor influencia de agua superficial.
- 3.- Hacia la planicie costera, la infiltración de agua a lo largo del cauce del Río Fuerte y los canales de riego, es una importante fuente de recarga del acuífero.
- 4.- Existen algunos pozos de agua salada en la planicie costera.
- 5.- Los resultados de los análisis de tritio, indicaron que el agua salada corresponde a "agua moderna", que ha disuelto horizontes evaporíticos.
- 6.- El agua subterránea del acuífero no está afectada por intrusión salina de tipo marino.

R E F E R E N C I A S

DROST W., H. Moser, F. Neumaier, W. Rauert. 1974. Isotope Methods in Ground Water Hydrology. Commission of the European Communities, Booklet 61.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. 1976. Interpretation of Environmental Isotope and Hydrogeochemical data in Ground Water Hydrology. Viena, Austria.

LATORRE Diez Carlos. 1978. Aplicación de Técnicas de Isótopos Ambientales al estudio del agua subterránea. S.A.R.H.

LATORRE C., J.M. Lesser, L. Quijano, B.R. Payne. 1981. Isótopos Ambientales aplicados al Estudio de la Interconexión de los Acuíferos Calizos y de Rellenos en la Región Lagunera de Coahuila, Durango, México. Interamerican Symposium on Isotope Hydrology, Bogotá, Colombia.

LOCALIZACION DE PUNTOS MUESTREADOS

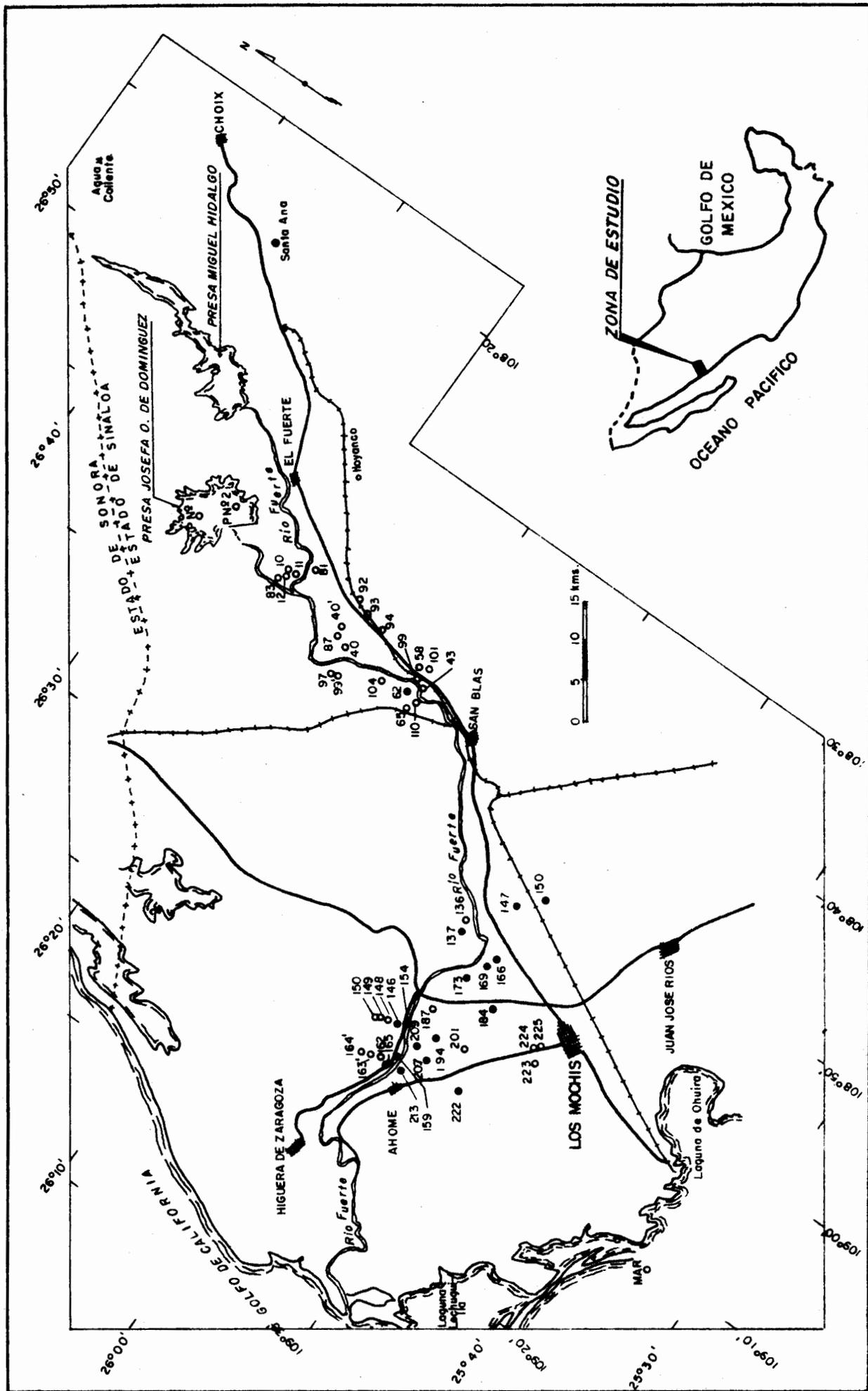


FIGURA N°

TABLA DE RESULTADOS DE ANALISIS ISOTOPICOS

MUESTRA No.	δD ‰	$\delta^{18}O$ ‰	MUESTRA No.	δD ‰	$\delta^{18}O$ ‰
40'-I	-41.6	-6.15	99-D	-47.1	-6.65
40-I	-41.9	-5.95	104-D	-43.7	-6.40
43-I	-41.2	-6.00	110-D	-45.5	-6.40
58-I	-33.5	-5.50	136-D	-42.4	-5.85
81-I	-35.9	-4.75	137-D	-47.7	-6.80
87-I	-43.6	-6.25	146-D	-48.5	-7.00
92-I	-40.2	-5.90	148'-D	-38.3	-5.65
93-I	-39.8	-5.85	149-D	-52.1	-7.30
94-I	-38.0	-5.60	150-D	-49.0	-7.05
99-I	-39.7	-5.85	154-D	-40.7	-6.45
101-I	-31.7	-4.80	194-D	-50.1	-7.30
147-I	-49.4	-6.95	159-D	-51.0	-7.30
150-I	-51.4	-7.25	162-D	-35.2	-4.75
166-I	-46.1	-6.40	163'-D	-35.9	-5.40
169-I	-49.7	-6.75	164'-D	-44.1	-6.05
173-I	-37.4	-5.25	165-D	-48.4	-7.0
184-I	-41.1	-5.65	P.No. 1-2 m	-32.50	-4.65
187-I	-39.4	-5.65	P.No. 1-5 m	-32.9	-4.60
201-I	-46.6	-6.55	P.No. 2-2 m	-32.4	-4.65
207-I	-48.3	-6.85	P.No. 2-5 m	-33.5	-4.85
209-I	-50.4	-7.00	Mar Topolobampo	-1.2	-0.25
213-I	-43.0	-6.45	E-1 Choix	-37.8	-5.55
222-I	-45.3	-6.50	E-2 Hoyanco	-38.6	-5.55
223-I	-45.5	-6.40	E-3 Santa Ana	-38.8	-5.55
224-I	-47.0	-6.50	E-4 Agua Caliente	-49.2	-6.75
225-I	-40.3	-5.20			
10-D	-34.2	-4.60			
11-D	-39.3	-5.30			
12-D	-28.6	-3.60			
62-D	-48.7	-6.85			
65-D	-47.4	-6.70			
83-D	-34.5	-4.10			
97-D	-46.6	-6.55			

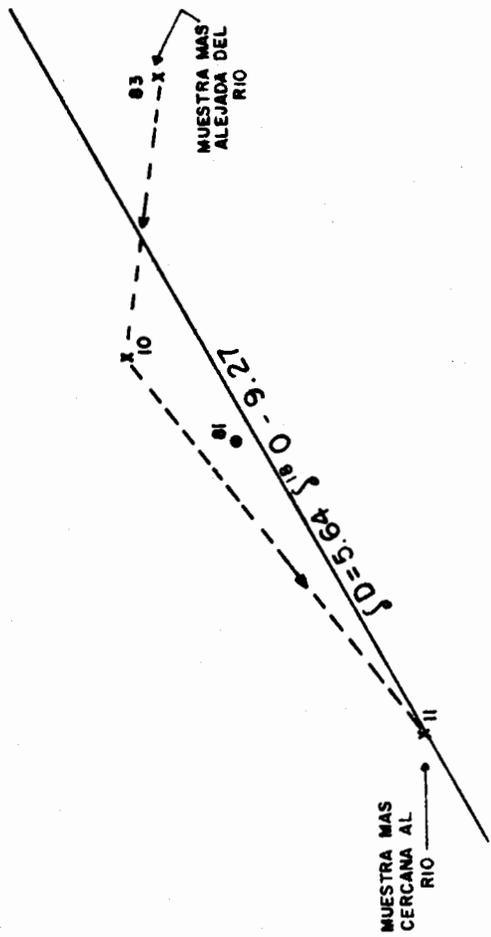
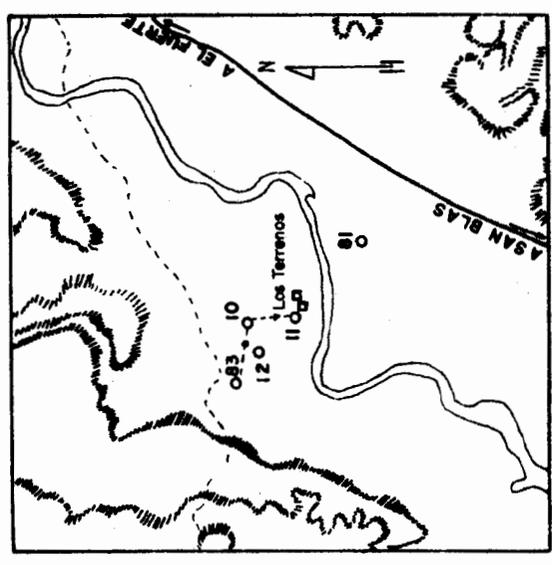
NOTA: Las letras I y D que siguen al número del aprovechamiento indican, la margen izquierda y derecha del río, respectivamente.

GRAFICA DE ISOTOPOS PESADOS RIO FUERTE
 RELACION $\delta D - \delta^{18}O$

SECCION I

$$\begin{cases} \delta D = -28.6 \\ \delta^{18}O = -3.6 \end{cases}$$

LOCALIZACION DE APROVECHAMIENTOS



COEFICIENTE DE DETERMINACION $r^2 = 0.89$

- x MARGEN DERECHA
- MARGEN IZQUIERDA

FIGURA Nº 4

o E-4 REPRESENTATIVA DE LA PRESA

GRAFICA DE ISOTOPOS PESADOS RIO FUERTE
 SECCION 2
 RELACION $\delta D - \delta^{18}O$

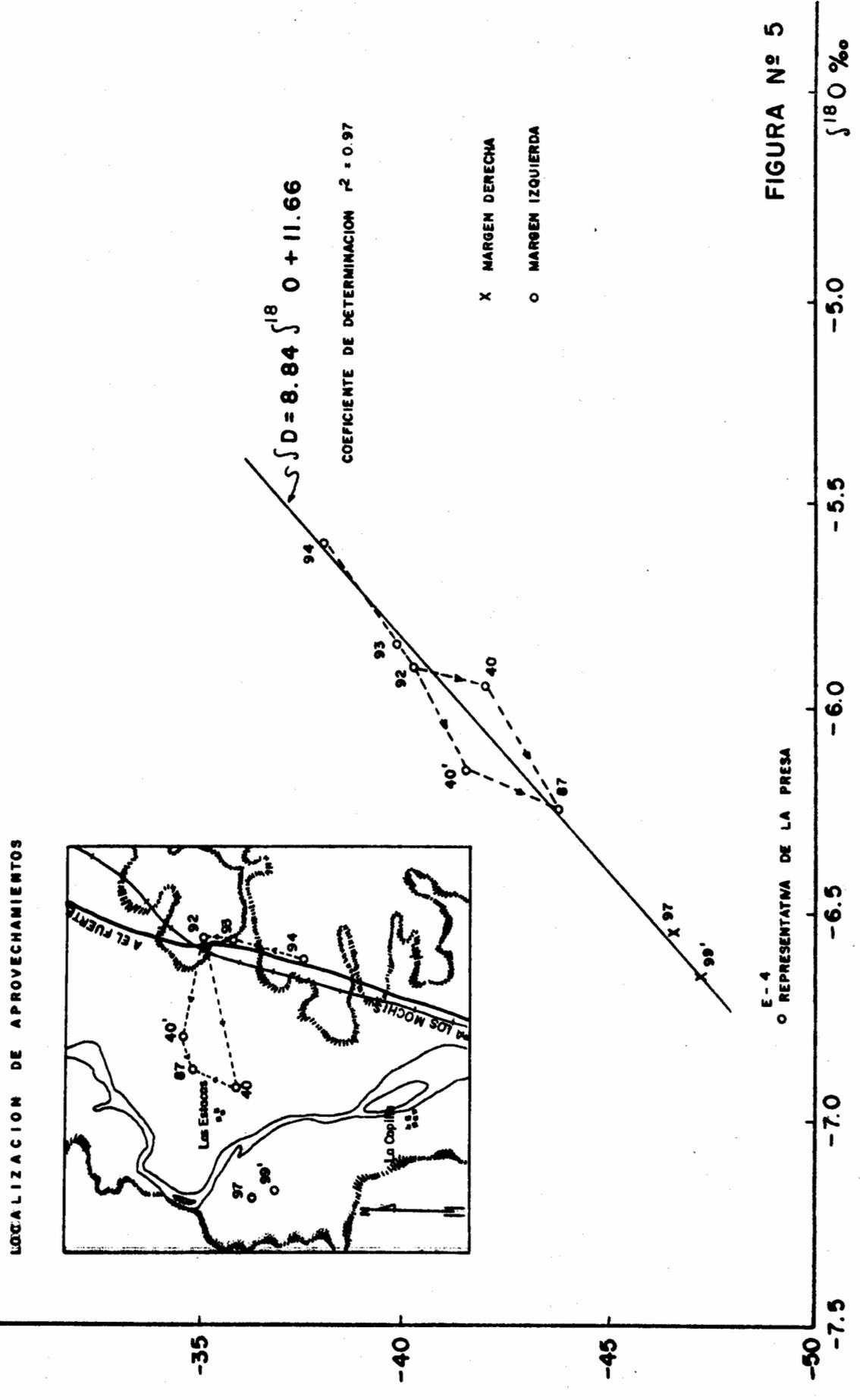


FIGURA N° 5

GRAFICA DE ISOTOPOS PESADOS RIO FUERTE
 SECCION 3 RELACION $\delta D - \delta^{18}O$

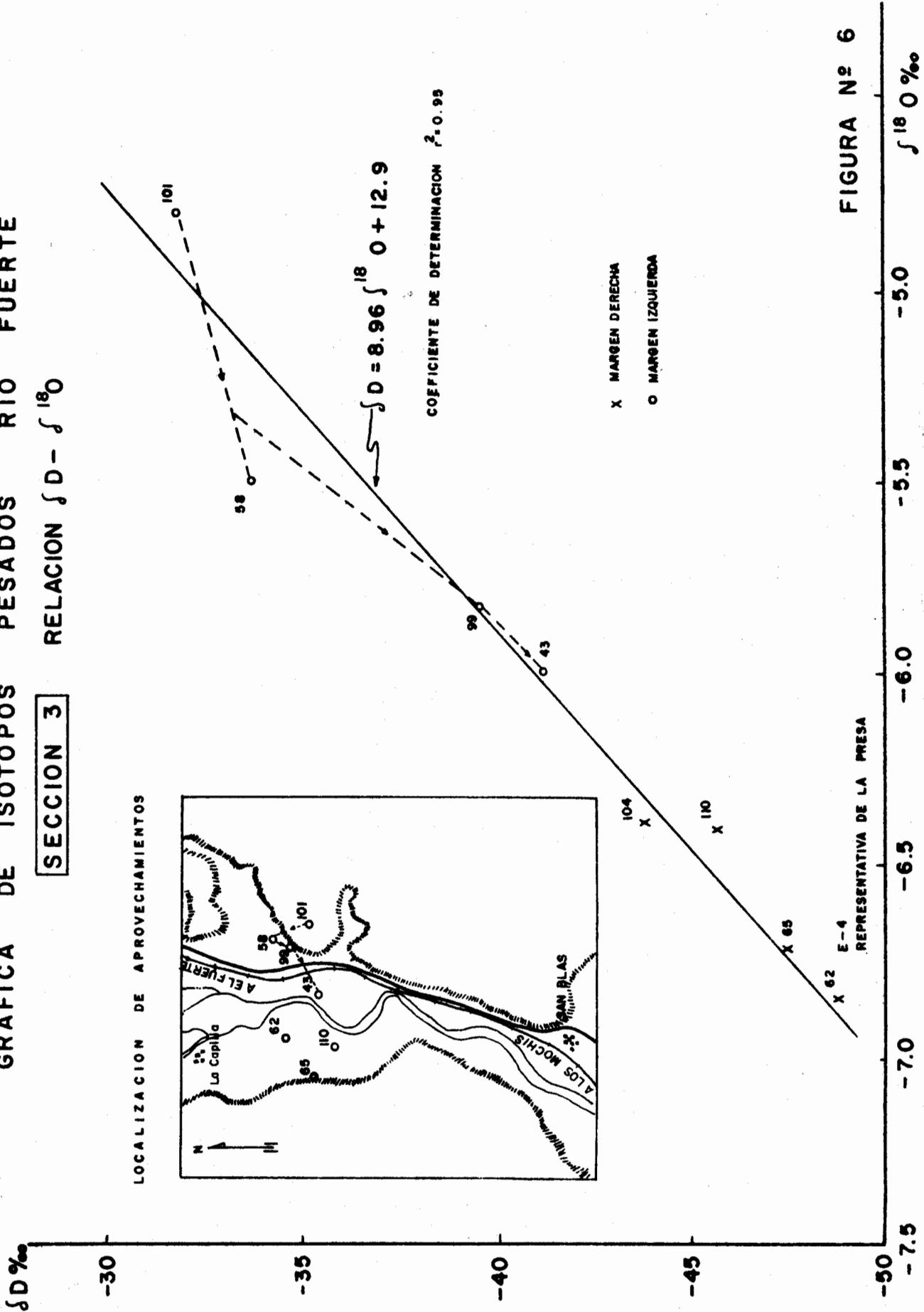
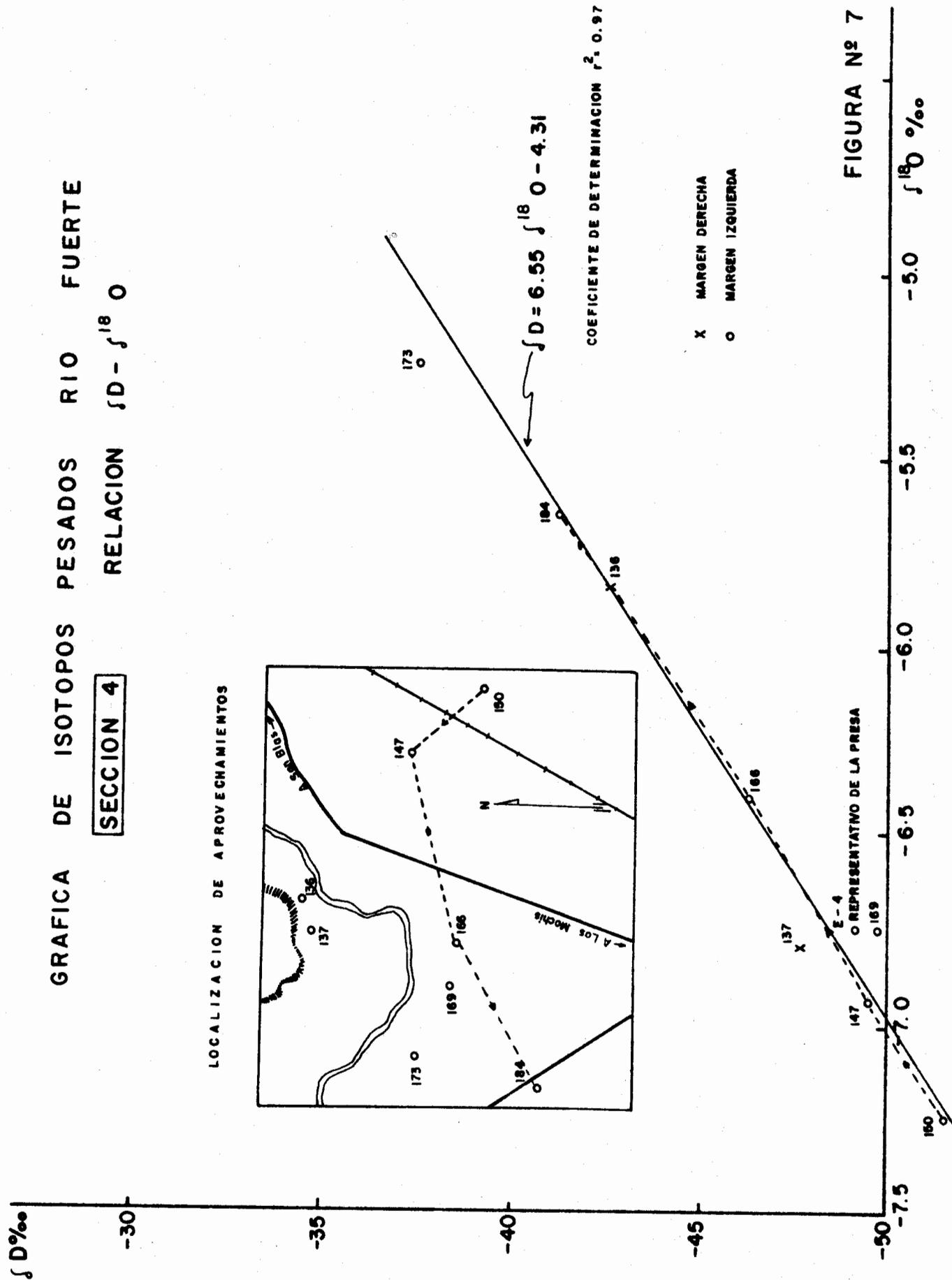


FIGURA N° 6

GRAFICA DE ISOTOPOS PESADOS RIO FUERTE
SECCION 4
 RELACION $\delta D - \delta^{18} O$



GRAFICA DE ISOTOPOS PESADOS RIO FUERTE

SECCION 5

RELACION $\delta D - \delta^{18}O$

$\delta D \text{‰}$

-30

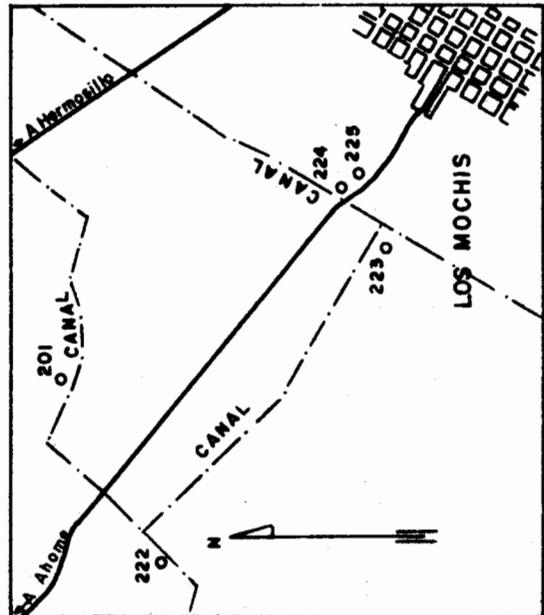
-35

-40

-45

-50

LOCALIZACION DE APROVECHAMIENTOS



$\delta D = 4.53 \delta^{18}O - 16.73$

COEFICIENTE DE DETERMINACION $r^2 = 0.95$

O MARGEN IZQUIERDA

E-4
O REPRESENTATIVA DE LA PRESA

FIGURA N° 8

-7.5

-7.0

-6.5

-6.0

-5.5

-5.0

$\delta^{18}O \text{‰}$

GRAFICA DE ISOTOPOS PESADOS RIO FUERTE
 SECCION 6 RELACION $\delta D - \delta^{18}O$

LOCALIZACION DE APROVECHAMIENTOS

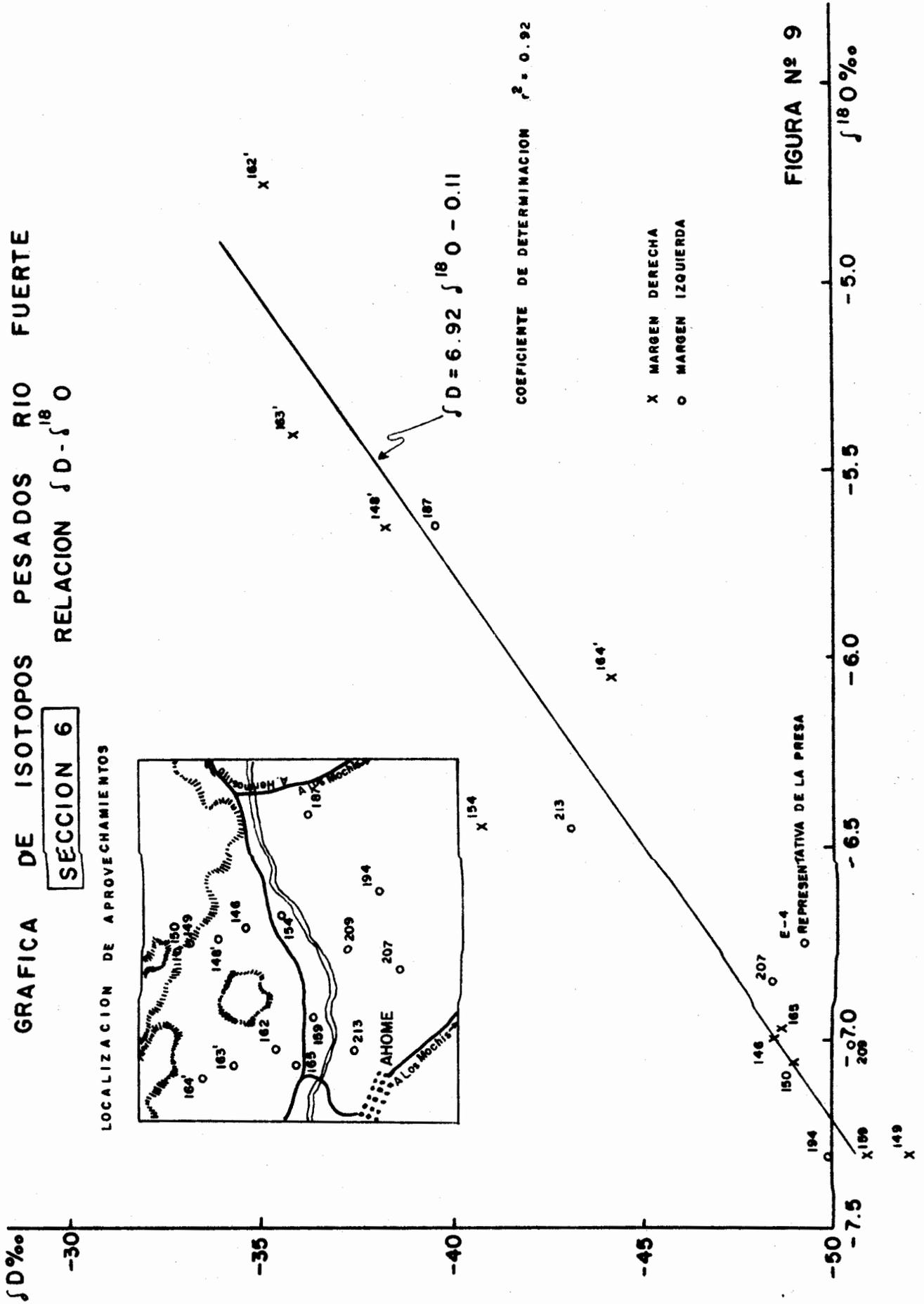
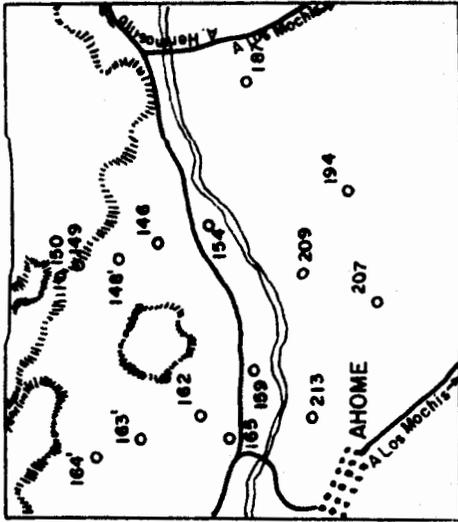


FIGURA N° 9

GRAFICA COMPARATIVA $\int D - \int^{18} O$
 RIO FUERTE

PRESA JOSEFA O.
 DE DOMINGUEZ

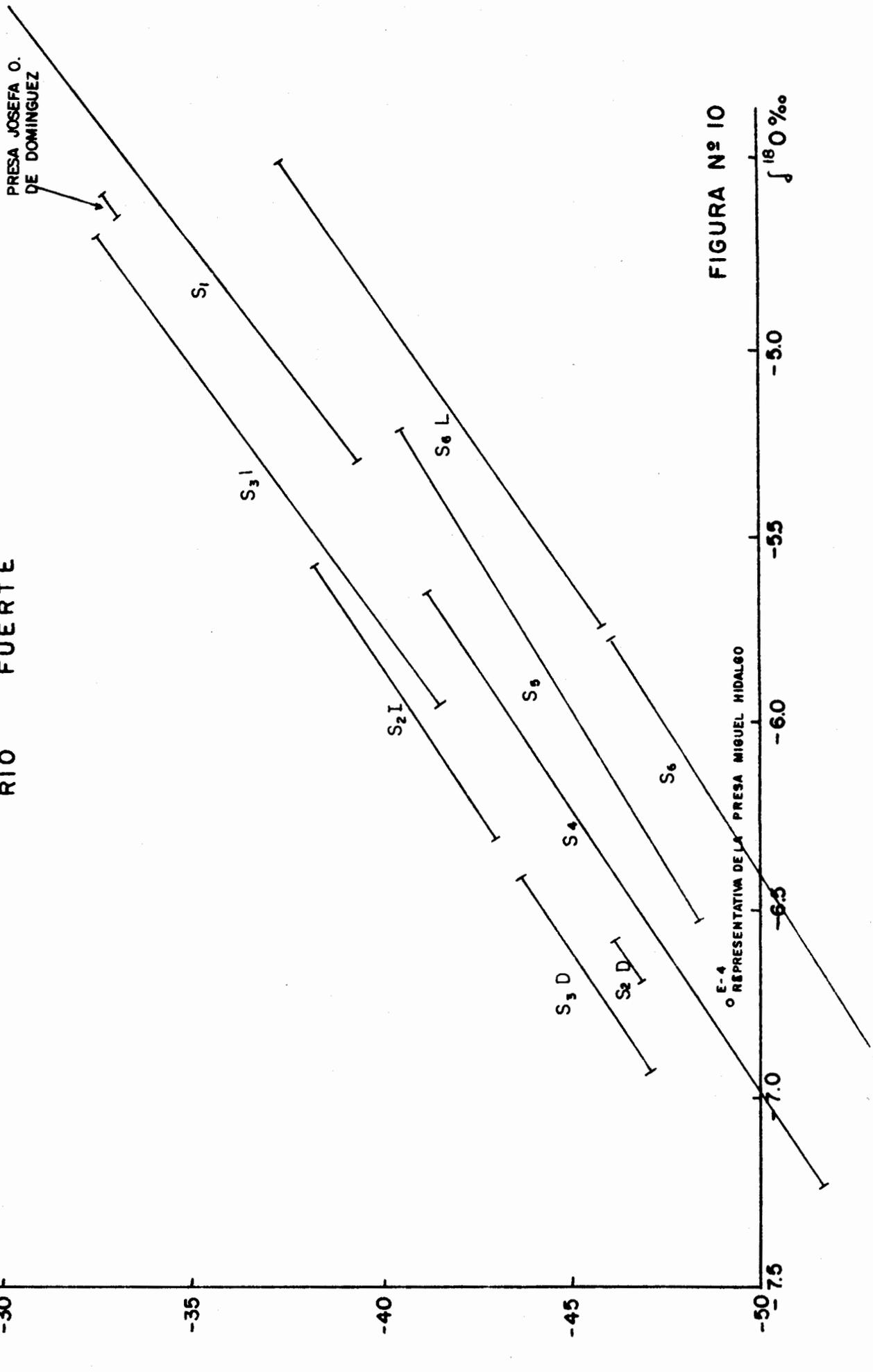


FIGURA N° 10

EFFECTO DE ALTITUD

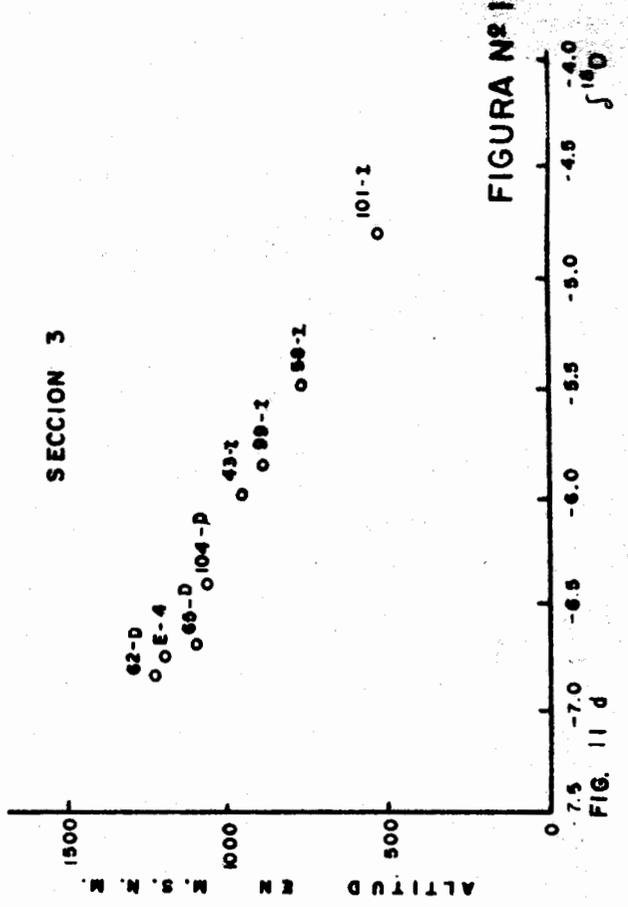
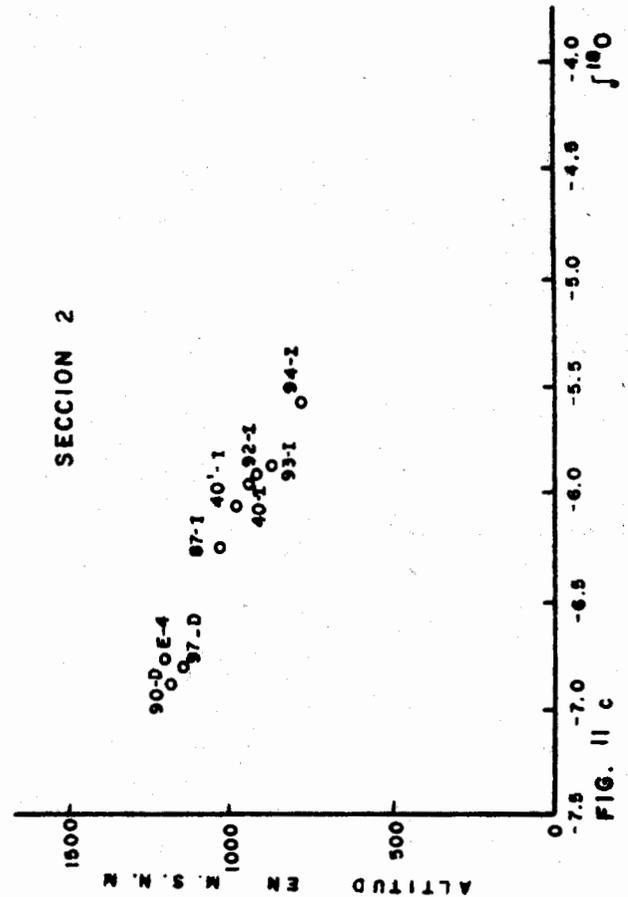
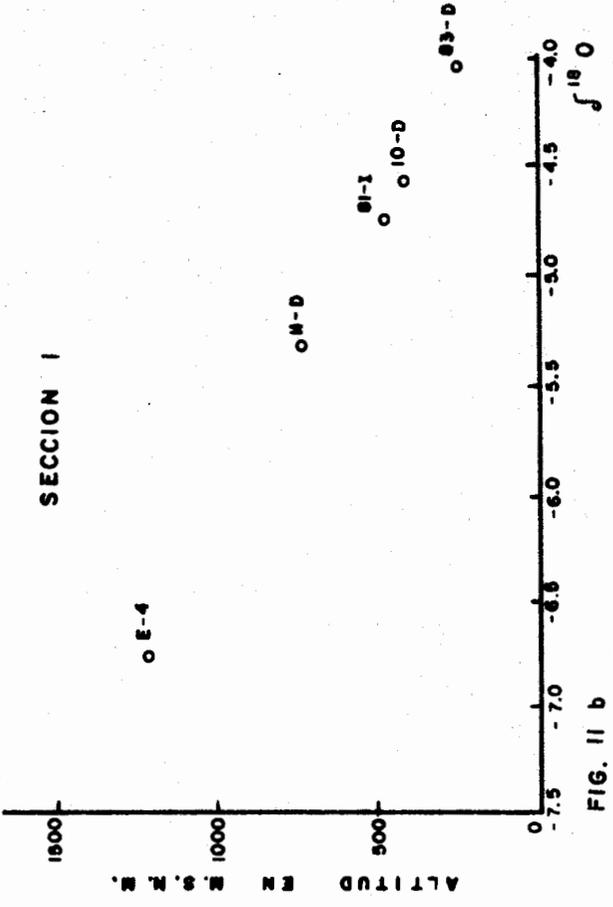
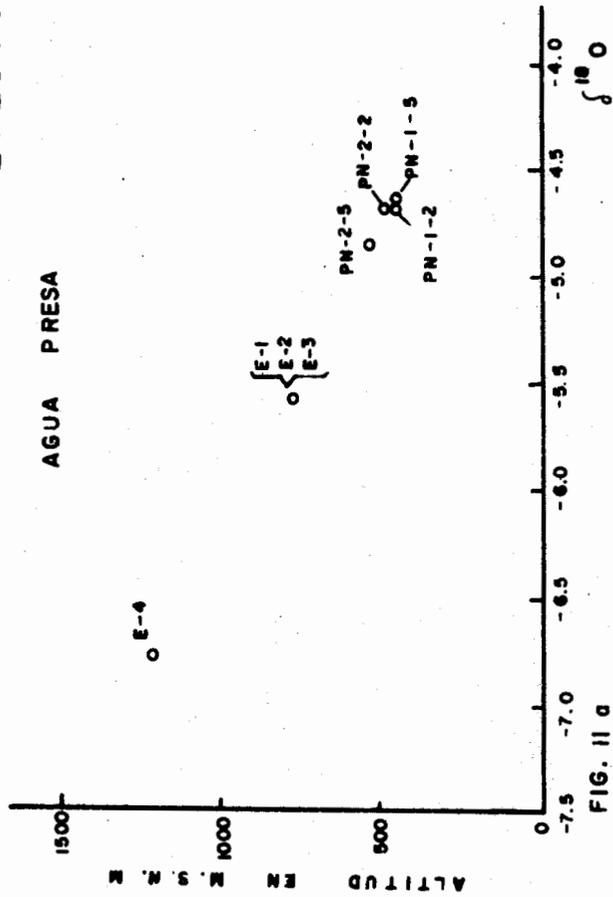


FIGURA Nº II

EFEECTO DE ALTITUD

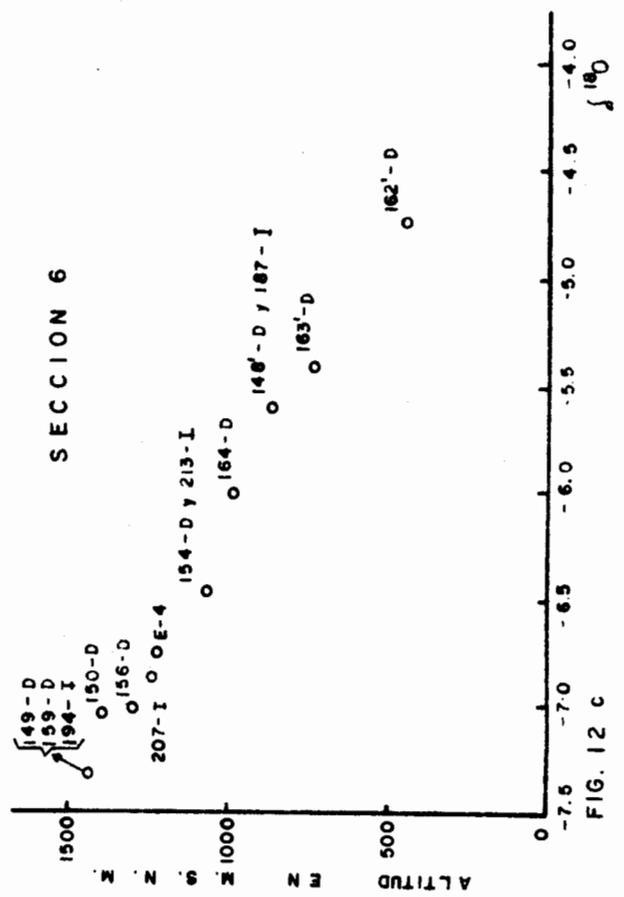
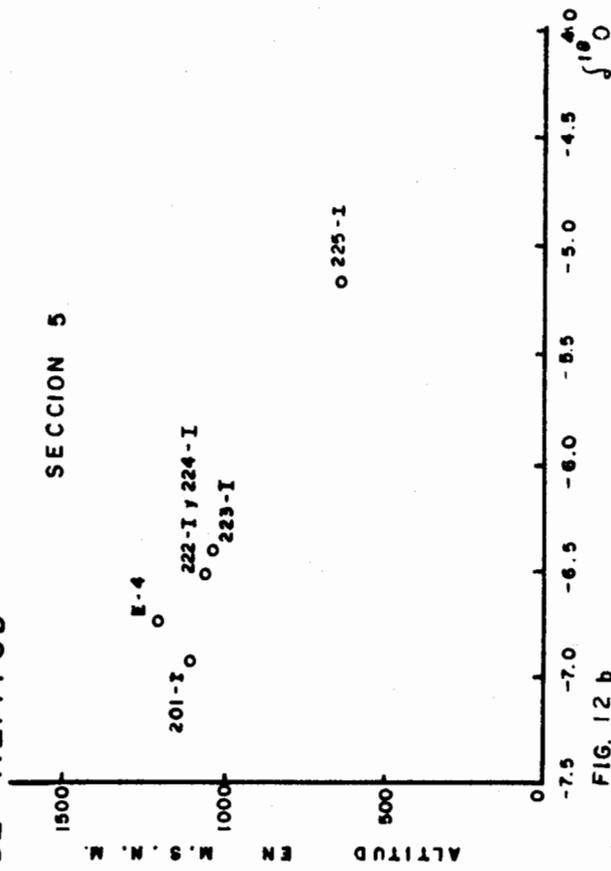
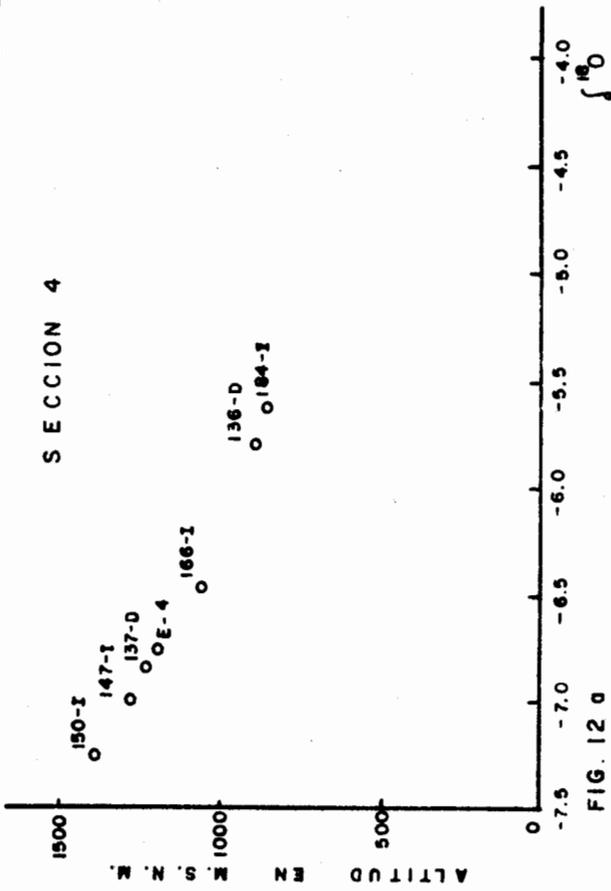


FIGURA Nº 12