



INSTITUTO GEOFISICO DEL PERU

DETERMINACION DEL AREA DE RESOLUCION HIPOCENTRAL ASOCIADO A LA GEOMETRIA DE LA RED SISMICA TELEMETRICA DE TABLACHACA A PARTIR DE SISMOS TEORICOS

por:

Hernando Tavera
Simeon Rodriguez



LIMA - PERU
Enero - 1999

int técnico
x 1181

RESUMEN

Utilizando 1,510 sísmicos teóricos generados en el área del Complejo Mantaro (Electroperu), se evalúa el área de resolución que ofrece la actual Red Sísmica Telemétrica de Tablachaca (RSTT) y las mejoras que se obtendrían de ampliarse el número de estaciones y la cobertura de la red. Los resultados obtenidos muestran que las áreas de mayor resolución se localizan en el centro de la RSTT con sismos cuyos parámetros hipocentrales son correctamente resueltos; mientras que, para los sismos localizados en la periferie y fuera de la RSTT, los parámetros hipocentrales se perturban considerablemente; siendo, la profundidad del foco el peor determinado. Se observa que los errores en la localización y profundidad de los focos se incrementan en función de la relación Δ/h (Δ = distancia epicentral, h profundidad del foco).

1.- INTRODUCCION

Conocer los parámetros hipocentrales de los sismos es de importancia para cualquier estudio que se realice en sismología; por lo tanto, es necesario determinar con precisión su localización geográfica y su profundidad. Por esta razón, el algoritmo de cálculo hipocentral que se elija para tal efecto, permitirá obtener resultados correctos en función del número de estaciones sísmicas que se utilice y de las condiciones particulares que ofrecen las redes sísmicas. Actualmente, todos los algoritmos que existen para el cálculo de los parámetros hipocentrales de un sismo se basan en la metodología desarrollada por Geiger en 1912 y a la fecha, ninguno de estos algoritmos cumple de manera general con los requerimientos necesarios para la localización de los sismos, debido a que su eficiencia dependerá básicamente de la geometría y del área de cobertura de la red sísmica.

Una técnica simple que permite evaluar a los algoritmos de calculo hipocentral (Rodriguez y Vasquez, 1987; Rodriguez y Tavera, 1989) y a las áreas de mayor resolución de acuerdo a la geometría y cobertura de las redes sísmicas (Tavera y Rodriguez, 1990), es el generar un cierto número de sismos teóricos cuyos parámetros hipocentrales son conocidos (latitud, longitud y profundidad) a fin de ser recalculados utilizando un determinado algoritmo. Al realizar el cálculo de los parámetros hipocentrales del sismo teórico (parámetros conocidos), debemos obtener como resultado los mismos datos de entrada; es decir, igual latitud, longitud y profundidad a la que fue generado el sismo. La experiencia ha mostrado que por lo general, los parámetros epicentrales (latitud y longitud) son determinados con rangos de error menores en relación a la incertidumbre existente en el calculo de la profundidad del foco, los mismos que aumentan cuando el hipocentro se aleja de la red sísmica considerada en el cálculo.

En el presente trabajo, se realiza la aplicación de esta técnica para evaluar el área de resolución que ofrece la Red Sísmica Telemétrica de Tablachaca (RSTT) como parte del convenio existente entre Electroperu y el Instituto Geofísico del Perú (IGP). Esta red sísmica está compuesta por cuatro estaciones con registro en tiempo real y formato digital con la posibilidad de ampliarse a siete durante el año 1999. Durante el proceso rutinario para calcular los parámetros hipocentrales de los sismos ocurridos en la zona de estudio en 1997 y parte de 1998, se observó la existencia de discrepancias en los resultados obtenidos utilizando diferentes condiciones de contorno para un mismo algoritmo de cálculo hipocentral (número de estaciones, modelo de velocidad, relación de Poisson, etc); además, solamente un número reducido de sismos eran localizados correctamente. Estos resultados generaron cierta ambigüedad en la validez de las localizaciones que se han venido obteniendo para los sismos ocurridos en la zona de estudio. Así mismo, se observó que los sísmicos localizados a distancias grandes de la RSTT, presentaban errores altos en relación a los que se localizaban cerca de la RSTT, lo cual podría ser debido al número y a una mala cobertura azimutal de las estaciones consideradas en el cálculo. Estos resultados ponen en evidencia la necesidad de contar con una mayor densidad de estaciones debidamente distribuidas en el área del Complejo Mantaro.

Por otro lado, el interés de este estudio al margen de las implicaciones teóricas en el sentido estadístico, es analizar en base a una idea simple que resultado se obtiene al calcular un hipocentro conocido utilizando una red sísmica de características especiales como la RSTT. La experiencia ha mostrado que los resultados en algunos casos están en contradicción con las estimaciones estadísticas; es decir, muchos hipocentros pueden mostrar una aceptable convergencia en sus resultados, permitiendo que se realicen interpretaciones físicas que pueden no ser reales. Estas incoherencias son observadas cuando se utiliza información teórica, pero si esto ocurre con datos reales, entonces erróneamente se asumiría un resultado como correcto. Además, este análisis permite sugerir que los resultados que se obtienen durante el cálculo hipocentral, están en relación directa con la geometría y cobertura de la red sísmica, además de las bondades del algoritmo utilizado.

2.- AREA DE ESTUDIO

En la Figura 1 se muestra el área de estudio y la localización de las estaciones sísmicas que integran la Red Sísmica Telemétrica de Tablachaca (RSTT). Esta área abarca la totalidad de los sistemas de fallas presentes en el área de estudio (Pampas, Jabonillos, Arhuayaco, Tablachaca) y ha sido elegida en base a la experiencia en cuanto se refiere a la ocurrencia de sísmicos que se han venido localizando durante 1997 y parte de 1998 dentro del convenio Electroperu-IGP. En la parte central del área de estudio se localiza la Represa de Tablachaca y el Túnel S200, elementos de mayor importancia dentro de la infraestructura del Complejo Mantaro. Así mismo, en esta Figura se muestra con triángulos en negro la localización de las estaciones que integran la actual RSTT y cuyas coordenadas geográficas se presenta en la Tabla 1. En esta misma Figura, se puede observar que las estaciones de TBLA, ATOC y QUIM se distribuyen alrededor del Complejo Mantaro cubriendo un área de 200 km² con centro en el Túnel S200. Únicamente, la estación de HUAN se localiza a 70 km aproximadamente en dirección NW con relación al Complejo Mantaro; es decir, fuera de la cobertura de la red sísmica local. Esta geometría de la RSTT, como se verá más adelante, juega un rol importante en la correcta determinación de los parámetros hipocentrales de los sismos que ocurren en el área del Complejo Mantaro.

3.- SISMOS TEORICOS

Para evaluar el área de mayor resolución hipocentral en función de la geometría y de las condiciones de cobertura de la Red Sísmica Telemétrica de Tablachaca (RSTT), se ha generado los tiempos teóricos de arribo de las fases P y S desde cada uno de los 1,510 puntos distribuidos en una malla que cubre toda el área de estudio (coordenadas geográficas y profundidad conocidas) hasta las diferentes estaciones sísmicas que integran la RSTT, tal como se muestra en la Figura 2. Los sismos teóricos han sido generados para puntos separados con un intervalo de 0.025 grados. Así mismo, en la Figura 2 se presenta además de

las estaciones sísmicas de la actual RSTT (Figura 1), la localización de las estaciones de Rundovilca (RUND), Walpari (WALP) y Quellococha (QUEL), las mismas que estarán en funcionamiento en el año 1999 (triángulos en blanco). Para el cálculo de los tiempos teóricos de las fases P y S se utiliza como modelo de corteza un semiespacio de velocidad constante ($V_p=6.0$ km/s) y el valor teórico para la relación de velocidades ($V_p/V_s=1.73$). Además, el algoritmo considera como datos de entrada el número de las coordenadas geográficas de las estaciones sísmicas a utilizarse y las coordenadas de los hipocentros para los cuales se desea generar los tiempos teóricos; siendo, el formato de salida similar al de entrada para el algoritmo de calculo hipocentral, EPI (Rodriguez, 1994).

Finalmente, se ha obtenido un conjunto de datos para 1,510 sismos teóricos generados para profundidades de 5 y 15 km considerando cada uno de los siguientes grupos de estaciones (Figura 2):

- . Grupo 1: HUAN, ATOC, TBLA, QUIM
- . Grupo 2: ATOC, TBLA y QUIM
- . Grupo 3: HUAN, ATOC, TBLA, QUIM, RUND, QUEL y WALP
- . Grupo 4: ATOC, TBLA, QUIM, RUND, QUEL y WALP

4.- APLICACIÓN DEL METODO

Para el calculo de los parámetros hipocentrales de los sismos teóricos se ha utilizado una versión del algoritmo FASTHYPO (Hermann, 1978) adaptada para su uso en el IGP por Rodriguez (1994), denominado EPI. Como datos de entrada el algoritmo utiliza un conjunto de estaciones sísmicas, un modelo de corteza y los tiempos de arribo de las ondas sísmicas a cada una de las estaciones utilizadas en el cálculo. Además, el algoritmo considera un conjunto de parámetros denominados "test parameters" que asocia la relación de velocidades (V_p/V_s), la profundidad inicial de cálculo, el máximo número de iteraciones y las condiciones de control sobre valores específicos que se debe asumir al momento de hacer el cálculo. El modelo de velocidad, el valor de la relación de velocidades y la profundidad inicial de los focos son los

misimos que fueron considerados en la generación de los sismos teóricos. Por otro lado, el numero de iteraciones esta asociado al mejor ajuste estadístico logrado por el algoritmo para la localización de cada uno de los sismos teóricos. Finalmente, a todas las lecturas de fases P y S se les asignó por defecto el peso máximo, a fin de que las estaciones utilizadas tengan igual participación en el cálculo de los parámetros hipocentrales de los sismos teóricos.

4.1.- La Red Sísmica Telemétrica de Tablachaca (RSTT)

En la Figura 3 se presenta los resultados obtenidos en el calculo de los parámetros hipocentrales de los sismos teóricos generados a una profundidad de 5 km utilizando las estaciones sísmicas del grupo 1; es decir, HUAN, ATOC, TBLA y QUIM. En esta Figura, los círculos en color azul corresponden a la localización de los sismos teóricos según la Figura 2 y los verdes a las obtenidas después de realizar el calculo de sus parámetros hipocentrales utilizando el algoritmo EPI. Los círculos en rojo indican los sismos cuyos parámetros hipocentrales han sido correctamente resueltos; es decir, su latitud, longitud y profundidad son idénticos a los valores teóricos. Debido a las características especiales de la RSTT y al interés de los estudios de sismicidad que se realizan en el Complejo Mantaro, se ha considerado como sismos correctamente resueltos aquellos que presentan errores en su localización y profundidad menores a 200 m.

El análisis general de la Figura 3, muestra que el número de sismos cuyos hipocentros han sido resueltos correctamente se limita solamente a 15, los mismos que se localizan en el centro de la RSTT. Sin embargo, se observa que la localización hipocentral de estos sismos son perturbadas mostrando cierta distribución en dirección de la estación sísmica de HUAN. Así mismo, tres de los sismos teóricos cuyos parámetros hipocentrales han sido resueltos se localizan entre la estación de HUAN y las estaciones de TBLA, ATOC y QUIM. Estas dos características muestran la fuerte influencia de la estación de HUAN en el calculo de los parámetros hipocentrales de los sismos teóricos localizados en el área del Complejo Mantaro. En la Tabla 2 se presenta los resultados numéricos obtenidos para el punto 12.40°S y 74.70°W localizado en el centro de la RSTT y en donde se observa que los errores en latitud, longitud y profundidad obtenidos para este sismo teórico, no pueden ser tomados en cuenta debido a que son despreciables, tal como indica el RMC de la solución. Para los demás sismos, se observa grandes discrepancias entre los paramentos epicentrales de inicio y los calculados; siendo la profundidad de los mismos el más perturbado ya que casi siempre el algoritmo se limito a colocar la profundidad de 0 km cuando la solución no converge o mayor

al valor inicial, tal como se observa en la Tabla 3 y cuya solución numérica corresponde a uno de los sismos localizados fuera de la cobertura de la red sísmica. La perturbación en la localización y profundidad de los sismos aumenta cuando mayor es la distancia entre el sismo teórico y cada una de las estaciones que forman parte de la red sísmica utilizada en su cálculo.

Así mismo, en la Figura 4 se presenta los resultados obtenidos para sismos localizados a una profundidad de 15 km utilizando las estaciones sísmicas del grupo 1. Un análisis similar al realizado anteriormente, permite observar que el área de mayor resolución hipocentral no muestra mayor diferencia que la obtenida para focos localizados a 5 km de profundidad; siendo, en este caso resueltos correctamente 12 sismos. Así mismo, los rangos de error en los parámetros hipocentrales de los sismos teóricos localizados fuera de la cobertura de la RSTT son similares.

En las Figuras 5 y 6 se presenta los resultados obtenidos para sismos teóricos generados a una profundidad de 5 y 15 km utilizando únicamente las estaciones distribuidas en el área del Complejo Mantaro; es decir, las estaciones del grupo 2 (ATOC, TBLA y QUIM). En ambas figuras se observa que el área de mayor resolución se concentra principalmente en el centro y en la periferie de la RSTT local. El número de sismos resueltos es mayor para los generados a una profundidad de 5 km (30 sismos) en relación a los generados a 15 km (24 sismos). Esta área de resolución comprende la Represa de Tablacha y el Túnel S200, infraestructuras de importancia para el Complejo Mantaro. Para sismos localizados fuera de la RSTT, la perturbación es mayor para la profundidad del foco y menor para su localización epicentral. En la Tabla 4 se presenta a manera de ejemplo, la solución numérica de un sismo teórico correctamente localizado debido a que se encuentra en el centro de la red y en la Tabla 5 para un sismo localizado fuera de la cobertura de la red. Una comparación entre ambas soluciones numéricas, permite observar diferencias importantes en los rangos de error para la latitud, longitud y profundidad de las localizaciones.

Si se realiza una comparación entre las áreas de mayor resolución obtenidas utilizando todas las estaciones de la RSTT (grupo 1) y las ubicadas en el Complejo Mantaro (grupo 2), se puede definir que el área de resolución hipocentral esta en función de la distancia epicentral (Δ) y la profundidad del foco (h); es decir, conforme el valor Δ/h sea menor, la resolución hipocentral aumentará y los errores en la localización serán mínimos.

Si se realiza una comparación entre las áreas de mayor resolución obtenidas utilizando todas las estaciones de la RSTT (grupo 1) y las ubicadas en el Complejo Mantaro (grupo 2), se puede definir que el área de resolución hipocentral esta en función de la distancia epicentral (Δ) y la profundidad del foco (h); es decir, conforme el valor Δ/h sea menor, la resolución hipocentral aumentará y los errores en la localización serán mínimos.

4.2.- Implementación de la Red Sísmica Telemétrica de Tablachaca

En la Figura 2 y Tabla 1 se muestra la localización y las coordenadas geográficas de las estaciones sísmicas de Rundovilca (RUND), Quellococha (QUEL) y Walpari (WALP); las mismas, que serán instaladas durante el año 1999 para el mejoramiento de la RSTT según el convenio existente entre Electroperu y el IGP. A continuación y como parte de este estudio se considera, además de las estaciones de las RSTT, las estaciones de RUND, QUEL y WALP a fin de evaluar el área de resolución hipocentral teniendo en cuenta que la cobertura de la nueva RSTT se incrementará notablemente. Siguiendo el orden anterior, primero se generan 1,510 sismos teóricos para profundidades de 5 y 15 km utilizando el total de las estaciones sísmicas, para luego ser localizados con el algoritmo EPI con las mismas estaciones sísmicas y las mismas condiciones de contorno con los cuales fueron generados.

En la Figura 7 se presenta los resultados obtenidos para sismos teóricos generados a una profundidad de 5 kms utilizando las estaciones del grupo 3; es decir, HUAN, ATOC, TBLA, QUIM, RUND, QUEL y WALP. El color de los círculos esta en función de los resultados obtenidos, tal como se ha indicado anteriormente. En esta Figura se observa que los hipocentros correctamente resueltos se incrementa a 31, quedando el resto del área perturbada principalmente en la periferie de las estaciones sísmicas que se localizan en el centro del Complejo Mantaro. Los parámetros hipocentrales de 9 sismos localizados en dirección de la estación de HUAN han sido correctamente resueltos, poniendo en evidencia nuevamente la fuerte influencia de esta estación en el calculo de los parámetros hipocentrales de los sismos teóricos. Así mismo, se observa que la localización de los sismos que se encuentran dentro del área formada por las estaciones de ATOC, TBLA, QUIM, RUND, QUEL y WALP es perturbada con cierta tendencia a distribuirse en dirección de la estación HUAN. En la Tabla

6 se presenta, a manera de ejemplo, los resultados numéricos obtenidos para un punto localizado dentro del área de cobertura de la RSTT (12.40°S y 74.70°W) y en donde se observa que los errores obtenidos para la latitud, longitud y profundidad son pequeños y pueden ser considerados como despreciables, tal como indica el RMC de la solución. Para los sismos localizados en la periferie y en el resto del área de estudio, las discrepancias entre los parámetros hipocentrales de inicio y los calculados son mayores principalmente para la profundidad del foco ya que casi siempre el algoritmo, por ejemplo, se limito a colocar la profundidad de 0 km cuando su solución no converge o profundidades mayores a la cual fueron generados, tal como se observa en la Tabla 7 para el punto 12.00°S , 75.00°W . La perturbación en la localización de los hipocentros aumenta considerablemente cuando mayor es la distancia entre el sismo teórico y las estaciones de la red sísmica utilizada en su calculo; siendo, estas más notorias en la profundidad de los focos.

En la Figura 8 se presenta los resultados obtenidos para sismos teóricos generados a una profundidad de 15 km considerando las estaciones sísmicas del grupo 3. En esta figura se observa que el área de resolución no muestra mayor diferencia que la obtenida para focos localizados a 5 km; sin embargo, el numero de sismos resueltos y alineados en dirección de la estación de HUAN se incrementa a 13. Así mismo se observa que los sismos cuyos parámetros hipocentrales fueron correctamente resueltos y que se localizan en el centro del Complejo Mantaro, tienden a distribuirse en dirección NW y ponen en evidencia el peso de la estación de HUAN en el calculo hipocentral de los sismos teóricos.

En las Figuras 9 y 10 se presenta los resultados obtenidos para sismos teóricos generados a una profundidad de 5 y 15 km utilizando únicamente las estaciones distribuidas en el área del Complejo Mantaro (grupo 4); es decir, ATOC, TBLA, QUIM, RUND, QUEL y WALP. En ambas Figuras se observa que el área de resolución se concentra principalmente dentro y en la periferie de la RSTT. El número de sismos cuyos parámetros hipocentrales fueron correctamente resueltos es mayor para los sismos generados a una profundidad de 5 km (58 sismos) en relación a los generados a 15 km (53 sismos). En la Tabla 8 se presenta un ejemplo de solución numérica para un sismo teórico cuyos parámetros hipocentrales han sido correctamente resueltos. El área de resolución comprende la Represa de Tablacha y el Túnel S200, infraestructura de importancia para el Complejo Mantaro. Así mismo, el área de

resolución abarca el tramo centro y sur de la falla de Jabonillos, el diorítico de Jabonillos y el extremo norte de la falla de Arhuayaco. Para sismos teóricos localizados en la periferie y fuera de la cobertura de la RSTT, la perturbación es mayor para la profundidad del foco y menor para su localización epicentral, tal como se observa en la Tabla 9 y cuya solución numérica corresponde al punto 12.00°S, 75.00°W.

Estos resultados permiten confirmar que la resolución hipocentral está en función de la distancia epicentral (Δ) y la profundidad del foco (h); es decir, conforme el valor Δ/h sea menor, la resolución hipocentral aumentará; sin embargo, esto está limitado a una distancia crítica en la cual la localización del sismo será también perturbado, por ejemplo en la periferie de la RSTT.

5. DISCUSION Y CONCLUSIONES.

Considerando que todos los algoritmos de cálculo hipocentral obedecen al esquema físico matemático con el cual fueron desarrollados, cuando los rayos de los sismos son bien definidos, sismos que ocurren dentro del área de resolución hipocentral, no existe problemas para el cálculo correcto de los parámetros hipocentrales de un sismo. De ocurrir lo contrario, el cálculo se perturba dando como resultado valores totalmente inestables e incongruentes. Es por esta razón, que para tener una idea objetiva del rango de confiabilidad del calculo hipocentral considerando las condiciones especiales de cada red sísmica, es necesario que estas sean evaluadas con un determinado algoritmo. Este procedimiento permite identificar un área de resolución bien definida y un calificativo que indique el grado de confianza de un determinado cálculo. Esto es lo que se ha pretendido con este análisis simple considerando la Red Sísmica Telemétrica de Tablachaca (RSTT).

Utilizando sismos teóricos generados a profundidades de 5 y 15 km para una malla de 1,510 puntos y que cubre toda el área del Complejo Mantaro, se ha evaluado las áreas de mayor resolución hipocentral utilizando el algoritmo EPI y las estaciones que integran la actual RSTT. De este estudio se concluye lo siguiente:

- 1.- Las áreas de mayor resolución hipocentral utilizando las cuatro estaciones sísmicas de la actual RSTT (HUAN, TBLA, ATOC y QUIM) presentan similares características para focos localizados a 5 y 15 km de profundidad. Sin embargo, sus parámetros hipocentrales son influenciados por la estación de HUAN, generando cierto grado de incertidumbre en las soluciones.
- 2.- El área de mayor resolución hipocentral mejora notablemente cuando se considera únicamente las estaciones localizadas alrededor del Complejo Mantaro; es decir ATOC, TBLA y QUIM. El área de mayor resolución considera a la Represa de Tablachaca y el Túnel S200.

De acuerdo a los términos del Convenio existente entre Electroperu y el IGP, la RSTT debe implementarse durante el año 1999 con tres estaciones sísmicas adicionales, las mismas que permitirán mejorar la geometría y ampliar la cobertura de la actual RSTT. La aplicación del método a esta futura red sísmica, ha permitido obtener los siguientes resultados:

- 1.- El área de resolución hipocentral mejora considerablemente debido a que el número de hipocentros resueltos se incrementa; sin embargo, el utilizar la estación de HUAN en los cálculos hipocentrales genera incertidumbre debido a que los sismos correctamente resueltos tienden a distribuirse en dirección de la misma.
- 2.- Si se considera únicamente las estaciones localizadas alrededor del Complejo Mantaro (grupo 4), se observa que el área de resolución aumenta notablemente, siendo esta más homogénea y abarca la Represa de Tablachaca y el Túnel S200, infraestructuras de vital importancia para el Complejo Mantaro. Así mismo, el área de mayor resolución considera las fallas de Jabonillos y Arhuayaco, elementos directamente relacionados con los procesos de deformación local y por ende en la generación de los sismos.

La correcta localización de los sismos que ocurren en el área de estudio depende de la relación Δ/h ; es decir, cuanto menor sea el valor de esta relación mejor será la resolución de los parámetros hipocentrales de los sismos.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente estudio, todos los sismos ocurridos en esta región deben ser localizados sin considerar la información contenida en la estación de HUAN debido que esta por encontrarse fuera del área de cobertura de la RSTT, perturba considerablemente la localización hipocentral de los sismos.

Una comparación entre los resultados obtenidos para las áreas de mayor resolución considerando la actual RSTT y la red sísmica proyectada para el año 1999, permite observar que el área de mayor resolución se incrementaría notablemente con la ampliación de la RSTT y permitirá obtener mayor precisión en la localización de los sismos. Esta información de mayor calidad, permitirá obtener mejores resultados y por ende se podrá realizar un análisis mas detallado de los procesos sismotectónicos que gobiernan localmente los índices de deformación en el área del Complejo Mantaro.

6.- AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Sra. Ivonne Perez-Pacheco por su ayuda en la elaboración de las diferentes figuras que acompañan al presente estudio. Este trabajo se ha realizado como apoyo para la mejor explotación de la información sísmica registrada por la Red Sísmica Telemétrica de Tablachaca, Convenio Electroperu-IGP.

INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ

7.- BIBLIOGRAFIA

- Geiger, L.(1912). Probabilite method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only., *Bull. of St. Louis*, 8(1), 56-71.
- Herrmann, R.(1979). Fasthypo - A hypocenter location program. *Earthquake Notes*, 50(2), 25-37.
- Rodriguez, L. y Vasquez, M.(1987). Problemas Asociados a la Determinación Hipocentral. Optimización I., *Instituto Geofísico del Perú*, 66p.
- Rodriguez, L. y Tavera, H. (1989). Problemas Asociados a la Determinación Hipocentral. Optimización II., *Instituto Geofísico del Perú*, 66p.
- Tavera, H. y Rodriguez, L. (1990) Problemas Asociados a la Determinación Hipocentral utilizando la Red Sísmica del Ecuador., *Dirección de Serv. Téc.*, Instituto Geofísico del Perú, 23 p.
- Rodriguez, S. (1994). EPI. Un programa para el calculo de hipocentros. *Informe Interno*, Instituto Geofísico del Perú.

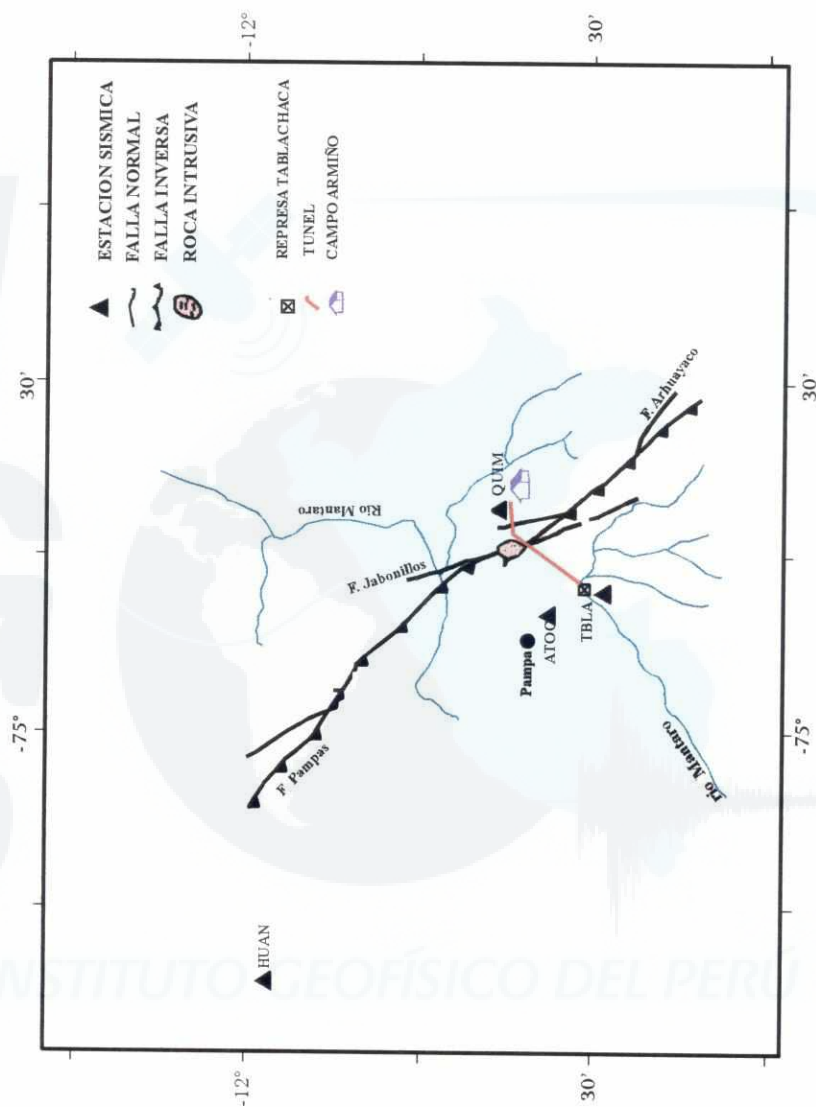


FIGURA 1.- Área del Complejo Mantaro (Electroperú) y localización de las estaciones de la Red Sísmica Telenétrica de Tablachaca (Tavera y Pérez-Pacheco, 1999).

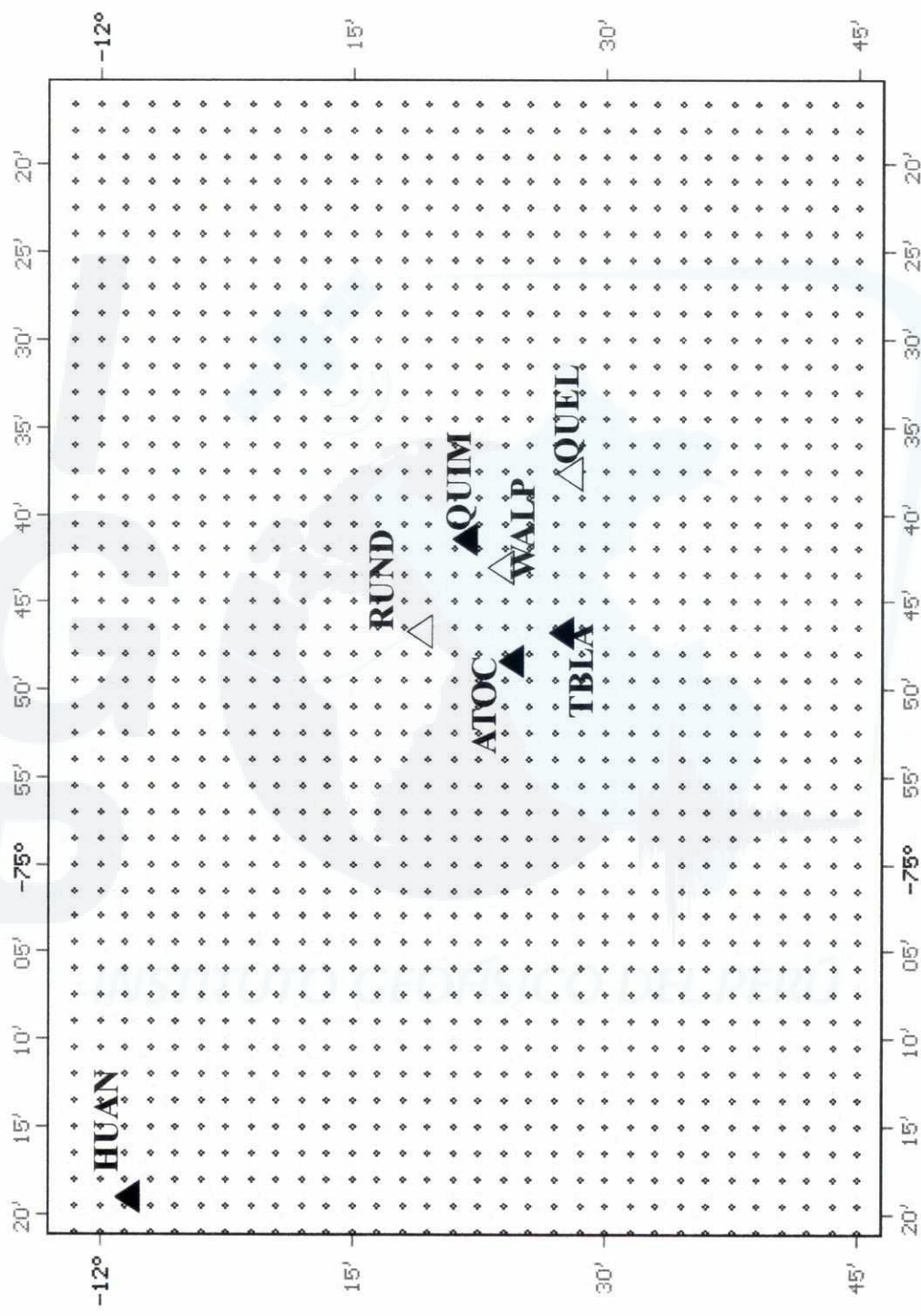


FIGURA 2.- Localización de los 1510 sismos teóricos generados en el área de estudio (círculos en blanco). Los triángulos en negro indican la localización de las estaciones sísmicas de la actual Red Sísmica Telemétrica de Tablachaca (Ver Figura 1) y los triángulos en blanco las estaciones sísmicas proyectadas para el año 1999.

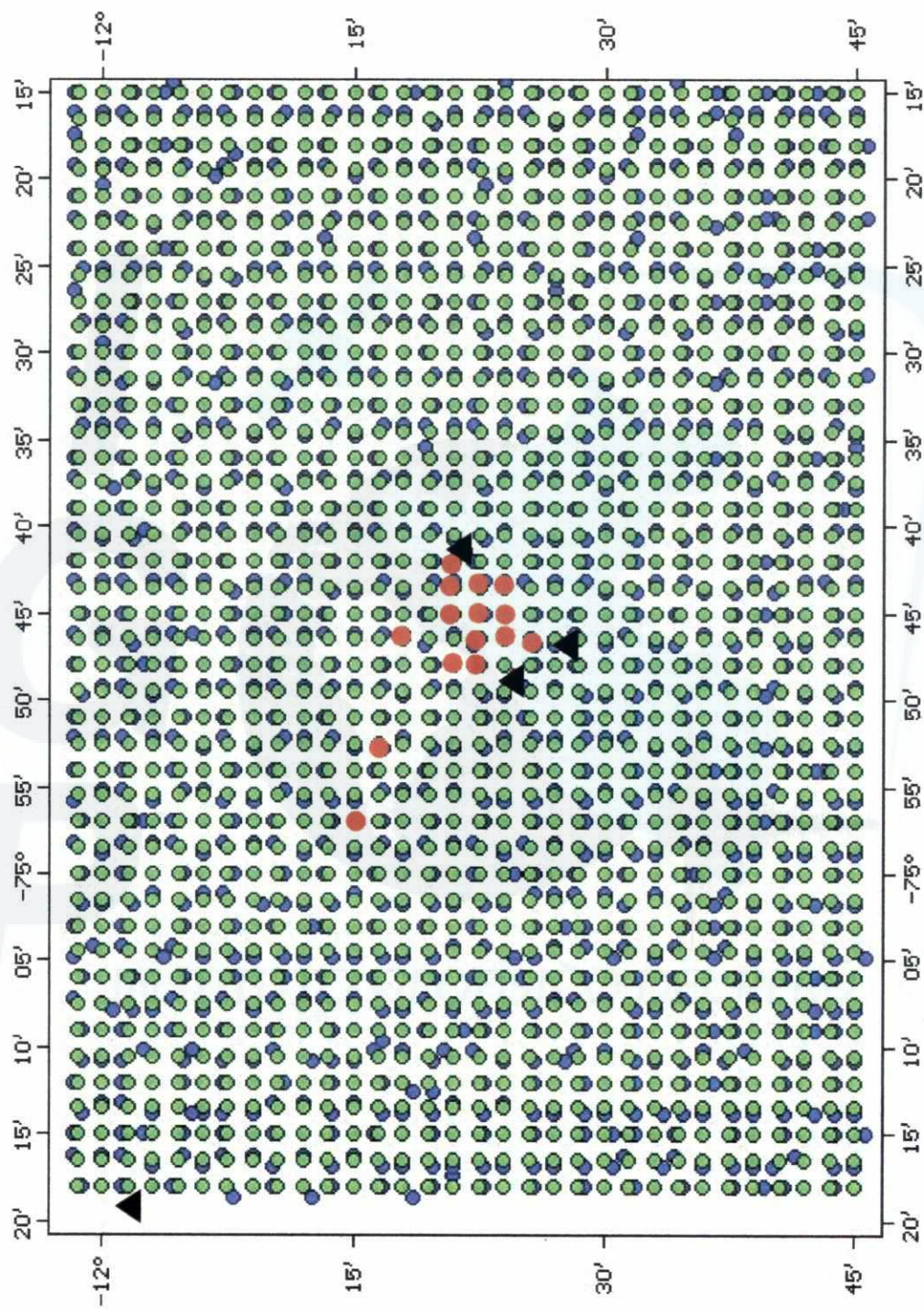


FIGURA 3.- Resultados obtenidos para los sismos Teóricos generados en una profundidad de 5 km. y procesados con el algoritmo EPI. Las estaciones sísmicas corresponden al grupo 1. Los círculos de color azul indican la localización de los sismos teóricos; los círculos en verde la localización obtenida con el algoritmo EPI y los círculos en rojo corresponden a los sismos correctamente localizados (Ver texto).

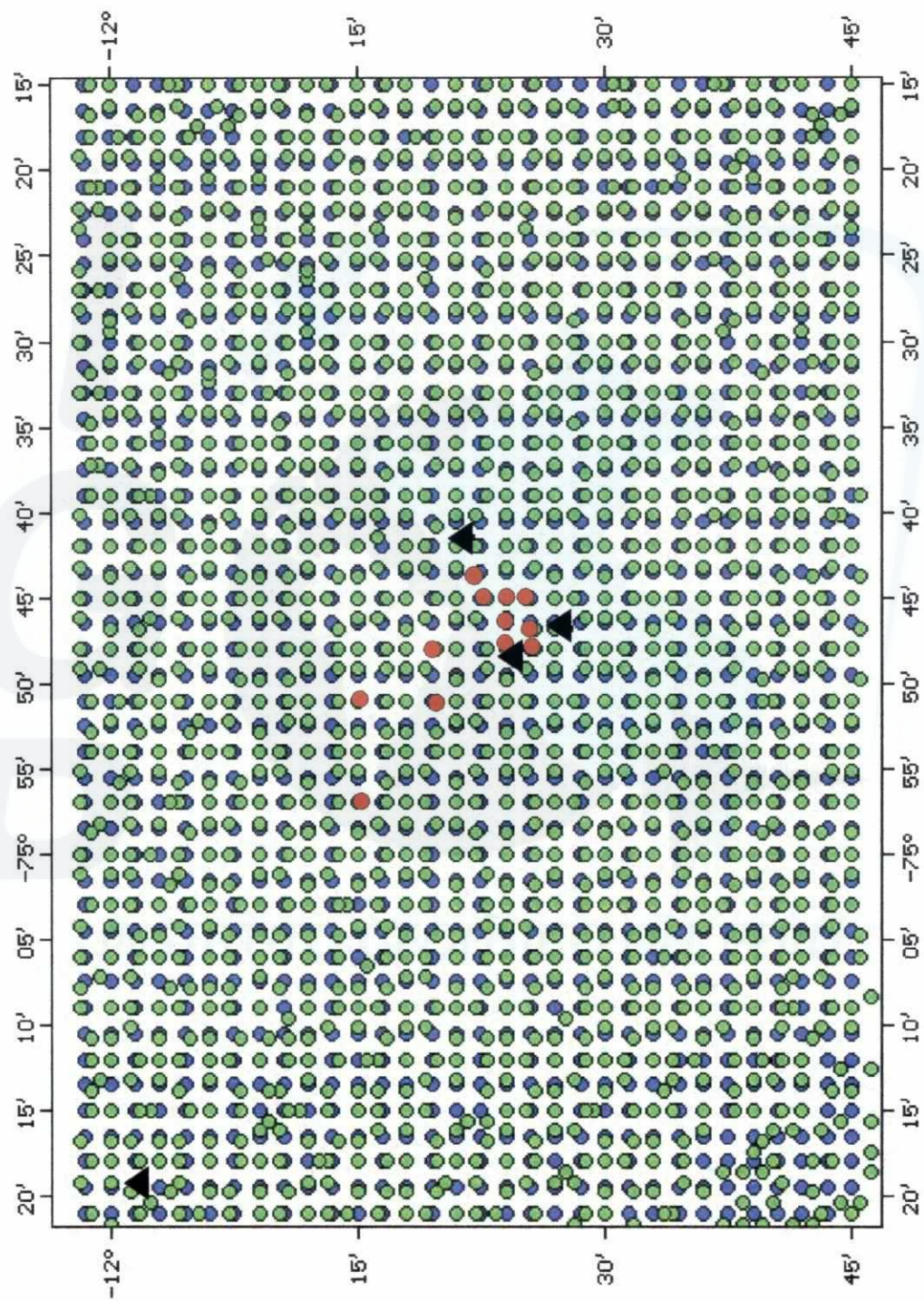


FIGURA 4.- Resultados obtenidos para sismos generados a una profundidad de 15 km. Las estaciones sísmicas corresponden al grupo 1. Otros ver Figura 3.

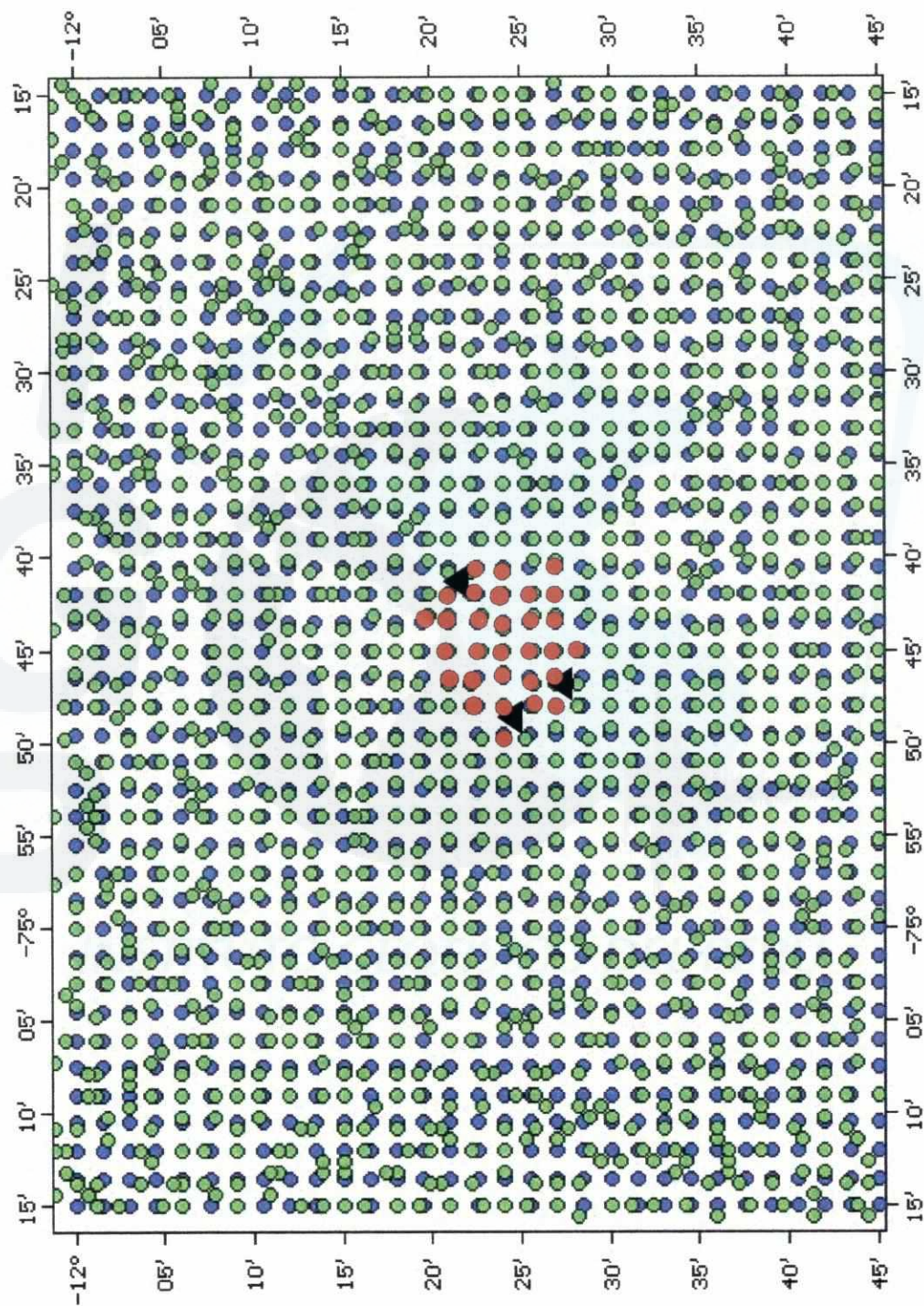


FIGURA 5.- Resultados obtenidos para sismos teóricos generados a una profundidad de 5 km. Las estaciones sísmicas corresponden al grupo 2. Otros ver Figura 3.

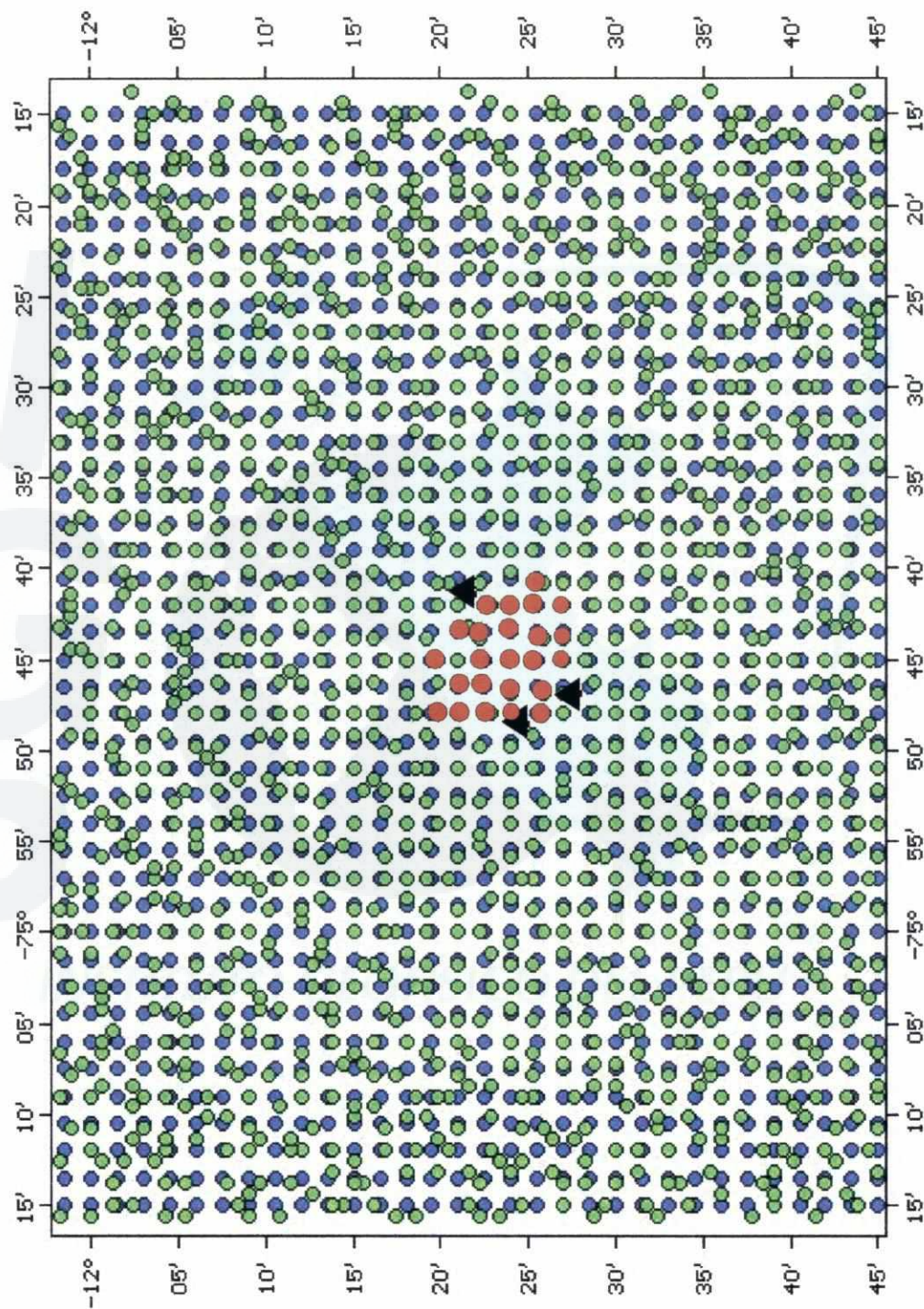


FIGURA 6.- Resultados obtenidos para sismos teóricos generados a una profundidad de 15 km. Las estaciones sísmicas corresponden al grupo 2. Otros ver Figura 3.

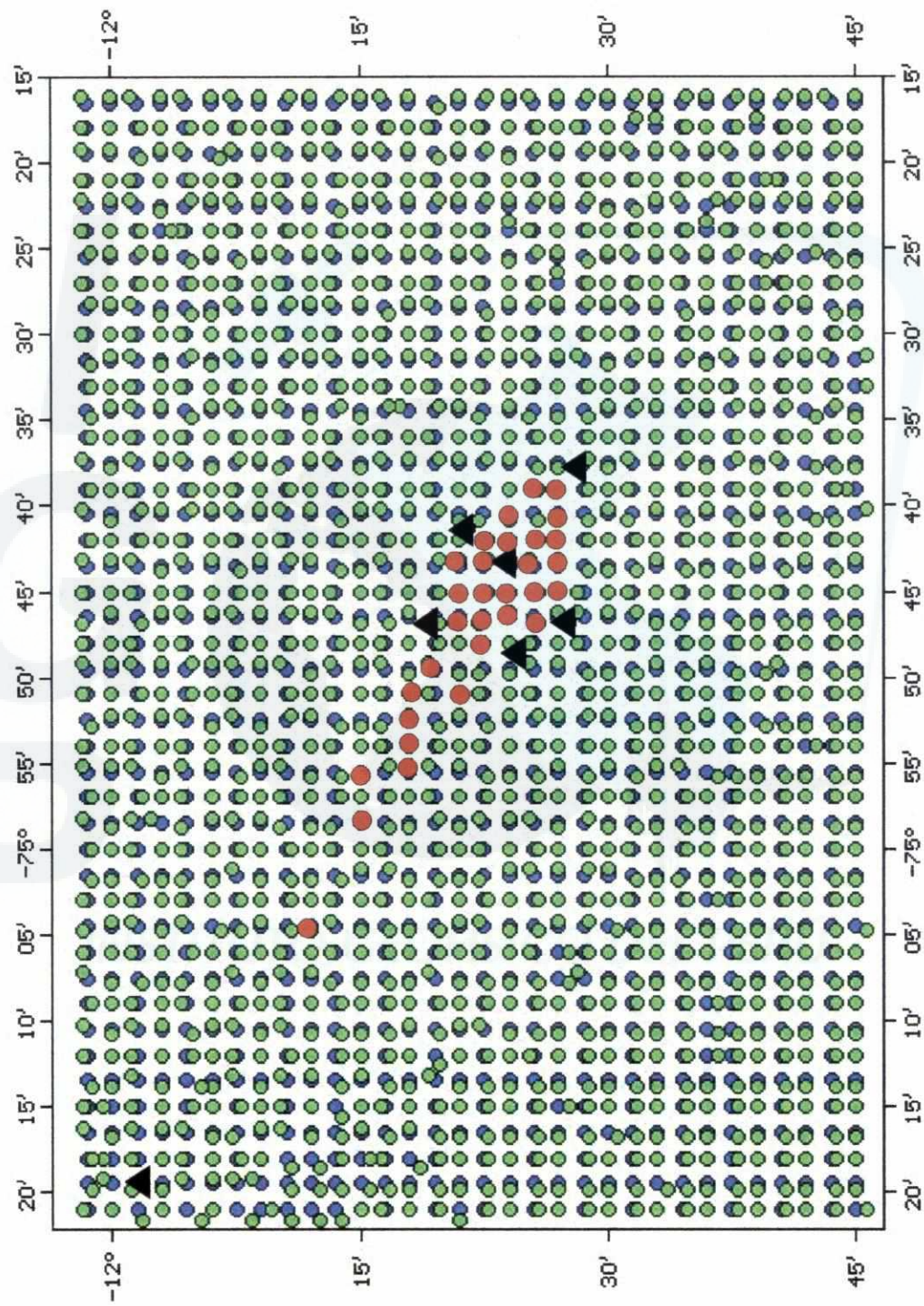


FIGURA 7.- Resultados obtenidos para sismos teóricos generados a una profundidad de 5 km. Las estaciones sísmicas corresponden al grupo 3. Otros ver Figura 3.

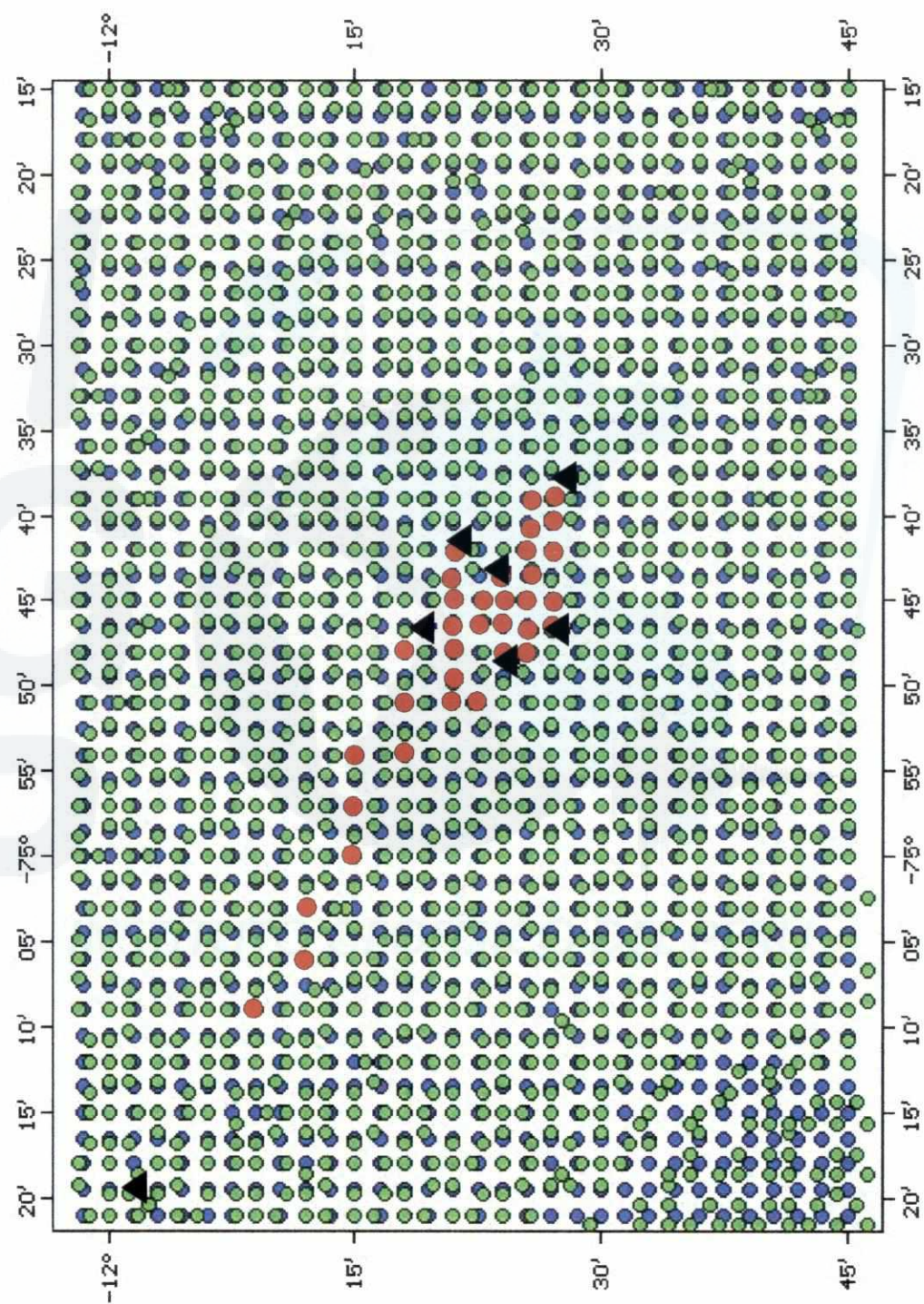


FIGURA 8.- Resultados obtenidos para sismos teóricos generados a una profundidad de 15 km. Las estaciones sísmicas corresponden al grupo 3. Otros ver Figura 3.

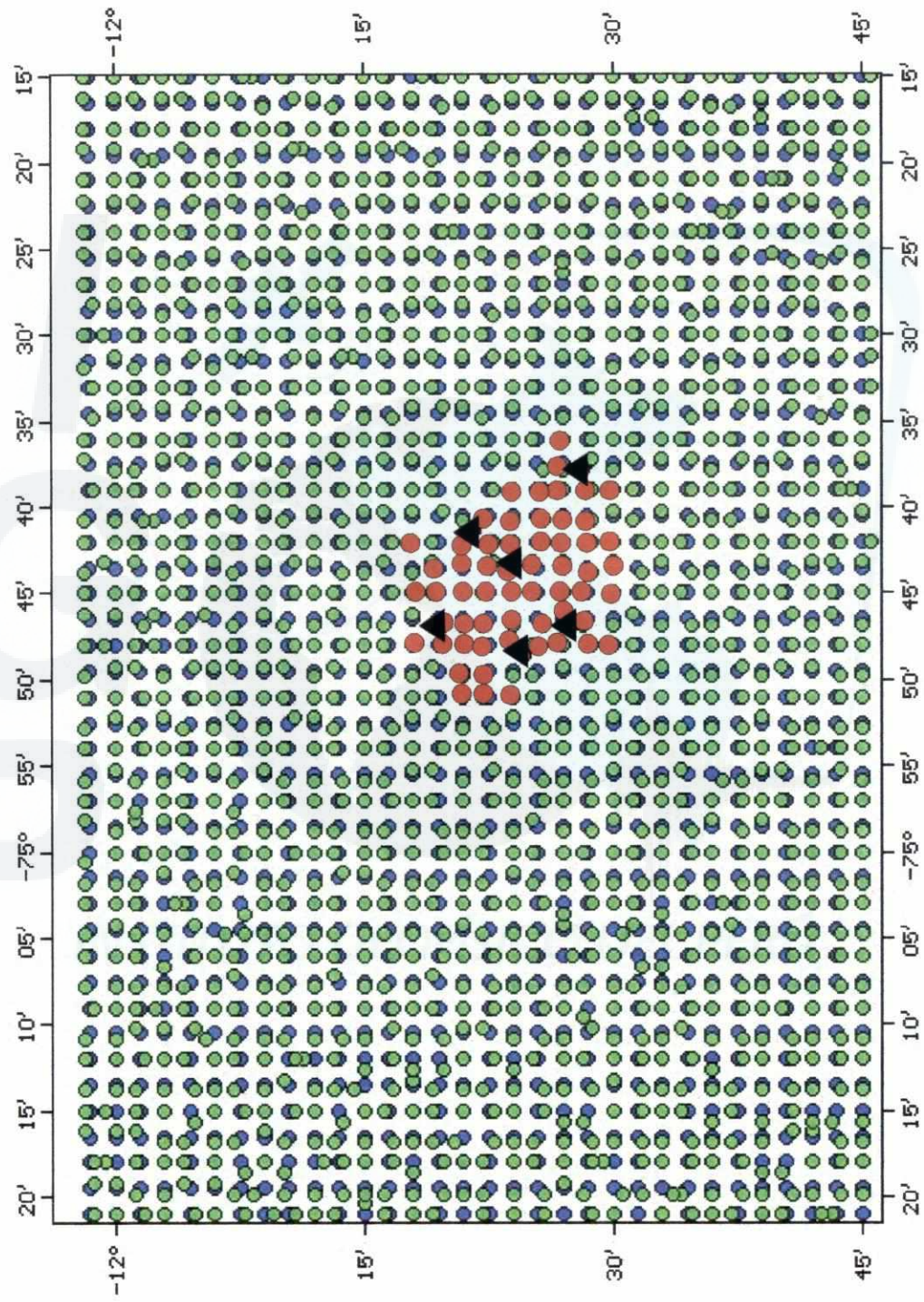


FIGURA 9.- Resultados obtenidos para sismos teóricos generados a una profundidad de 5 km. Las estaciones sísmicas corresponden al grupo 4. Otros ver Figura 3.

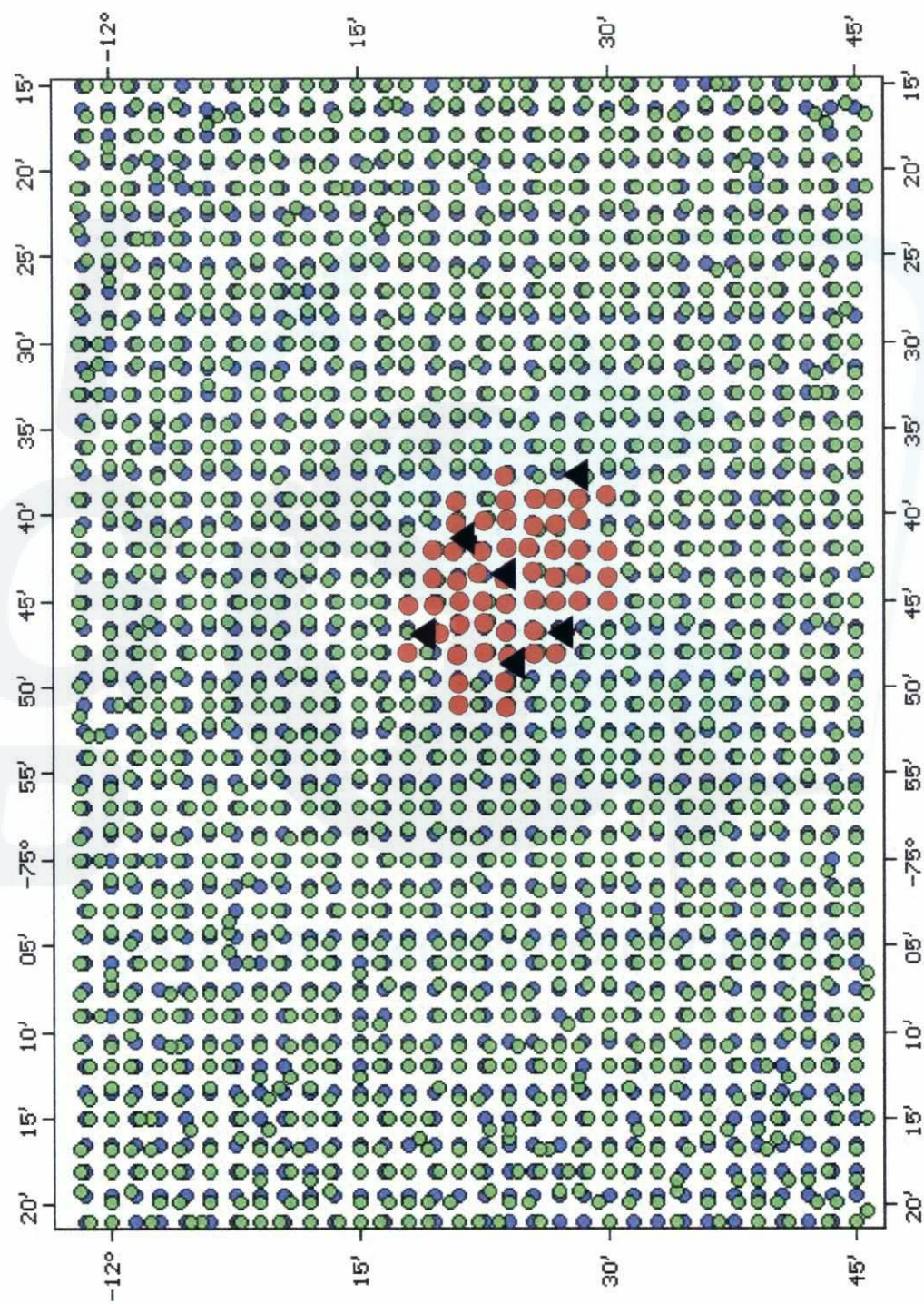


FIGURA 10.- Resultados obtenidos para sismos teóricos generados a una profundidad de 15 km. Las estaciones sísmicas corresponden al grupo 4. Otros ver Figura 3.

TABLA 1

*Coordenadas geográficas de las estaciones sísmicas de la
Red Sísmica Telemétrica de Tablachaca
(Convenio Electropetu-IGP)*

Codigo	Latitud Sur (grad-min)	Longitud Oeste (grad-min)	Altitud (m)	Comentarios
TBLA	12° 27.84'	74° 47.03'	2,871	RSTT
ATOC	12° 25.00'	74° 48.98'	4,592	RSTT
QUIM	12° 22.01'	74° 41.66'	3,921	RSTT
HUAN	12° 02.28'	75° 19.32'	3,330	RSTT
QUEL	12° 28.55'	74° 38.00'	4,230	RSTT-99
WALP	12° 24.17'	74° 43.15'	4,200	RSTT-99
RUND	12° 19.36'	74° 46.85'	3,240	RSTT-99

RSTT = Estación sísmica de la actual Red Sísmica Telemétrica de Tablachaca.

RSTT-99 = Estación sísmica a instalarse durante el año 1999.

TABLA 2

**Resultado numérico del programa EPI para el sismo teórico localizado en el punto
12.40°S, 74.70°W a una profundidad de 5 km.
Las estaciones sísmicas corresponden al grupo 1**

Sismo N° 783

Fecha: 31 Dic 1999 Hora Origen (GMT): 12h 11m 59.58s

Latitud: -12.4176 ± 0.1 km.

Longitud: -74.6701 ± 0.2 km.

Profundidad: 5.1 km ± 0.9 km.

Magnitud:

Intensidad:

Esta	Distan	Azm	Ain	TPCal	P-Seg	P-Res	W	S-Seg	S-Res	W
ATOC	16.1	269	117	2.8	2.3	-0.1	0	4.0	-0.3	0
TBLA	13.1	247	119	2.4	2.1	0.2	0	3.6	0.1	0
QUIM	6.2	335	132	1.4	1.0	0.1	0	1.8	-0.0	0
HUAN	82.4	301	113	13.8	13.1	-0.2	0	22.7	0.3	0

rmc = 0.05

GMT = Hora Universal
 Latitud = en grados
 Longitud = en grados
 Esta = Código de la estación sísmica
 Distan = Distancia epicentral en km
 Azm = Azimut estación-epicentro en grados
 Ain = Angulo de incidencia de la onda P en grados
 TPCal = Tiempo teórico para la onda P.
 P-Seg = Tiempo observado para la onda P
 P_Res = Residual para la onda P.
 W = Peso para las lecturas de ondas P y S.
 S-Seg = Tiempo observado para la onda S.
 S-Res = Residual para la onda S
 rmc = Raíz media cuadrática

TABLA 3

**Resultado numérico del programa EPI para el sismo teórico localizado en el punto
12.00°S, 75.00°W a una profundidad de 5 km
Las estaciones sísmicas corresponden al grupo 1
(siglas, ver Tabla 2).**

Sismo N° 415

Fecha: 31 Dic 1999 Hora Origen (GMT): 12h 11m 59.07s

Latitud: -11.9816 ± 1.2 km.

Longitud: -75.0068 ± 0.8 km.

Profundidad: 21.0 km. ± 2.0 km.

Magnitud:

Intensidad:

Esta	Distan	Azm	Ain	TPCal	P-Seg	P-Res	W	S-Seg	S-Res	W
ATOC	52.8	157	119	9.5	8.5	-0.0	0	14.7	-0.1	0
TBLA	58.9	155	118	10.4	9.5	0.0	0	16.5	0.1	0
QUIM	54.7	142	119	9.8	8.8	-0.0	0	15.3	0.0	0
HUAN	34.8	260	125	6.8	5.9	0.1	0	10.3	-0.0	0

rmc = 1.09

INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ

TABLA 4

**Resultado numérico del programa EPI para el sismo teórico localizado en el punto
12.40°S, 74.70°W a una profundidad de 5 km.
Las estaciones sísmicas corresponden al grupo 2
(siglas, ver Tabla 2).**

Sismo N° 783

Fecha: 31 Dic 1999 Hora Origen (GMT): 12h 12m 0.01s

Latitud: -12.4012 ± 0.2 km.

Longitud: -74.6495 ± 0.2 km.

Profundidad: 4.9 km ± 0.4 km.

Magnitud:

Intensidad:

Esta	Distan	Azm	Ain	TPCal	P-Seg	P-Res	W	S-Seg	S-Res	W
ATOC	18.4	263	116	3.2	3.2	0.0	0	5.5	-0.0	0
TBLA	15.9	244	117	2.8	2.8	0.0	0	4.8	-0.0	0
QUIM	6.1	308	131	1.3	1.3	-0.0	0	2.3	0.0	0

rmc = 0.03

INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ

TABLA 5

**Resultado numérico del programa EPI para el sismo teórico localizado en el punto
12.00°S, 75.00°W a una profundidad de 5 km.
Las estaciones sísmicas corresponden al grupo 2
(siglas, ver Tabla 2)**

Sismo N° 415

Fecha: 31 Dic 1999 Hora Origen (GMT): 12h 12m 0.03s

Latitud: -11.9961 ± 1.2 km.

Longitud: -74.9471 ± 1.2 km.

Profundidad: 0.0 km. ± 0.0 km.

Magnitud:

Intensidad:

Esta	Distan	Azm	Ain	TPCal	P-Seg	P-Res	W	S-Seg	S-Res	W
ATOC	49.1	163	113	8.2	8.2	-0.0	0	14.2	0.0	0
TBLA	55.0	161	113	9.2	9.2	0.0	0	15.9	0.0	0
QUIM	49.5	146	113	8.3	8.3	0.0	0	14.3	-0.0	0

rmc = 0.02

INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ

TABLA 6

**Resultado numérico del programa EPI para el sismo teórico localizado en el punto
12.40°S, 74.70°W a una profundidad de 5 km.
Las estaciones sísmicas corresponden al grupo 3
(siglas, ver Figura 2)**

Sismo N° 783

Fecha: 31 Dic 1999 Hora Origen (GMT): 12h 12m 0.00s

Latitud: -12.4004 ± 0.1 km.

Longitud: -74.8001 ± 0.1 km.

Profundidad: 5.1 km ± 0.1 km.

Magnitud:

Intensidad:

Esta	Distan	Azm	Ain	TPCal	P-Seg	P-Res	W	S-Seg	S-Res	W
ATOC	2.9	222	150	1.0	1.0	0.0	0	1.7	0.0	0
TBLA	7.4	164	128	1.5	1.5	0.0	0	2.6	0.0	0
QUIM	12.1	72	120	2.2	2.2	0.0	0	3.8	0.0	0
HUA	69.5	305	113	11.6	11.6	-0.0	0	20.1	0.0	0
RUND	8.7	8	124	1.7	1.7	0.0	0	2.9	-0.0	0
QUEL	19.9	115	116	3.4	3.4	-0.0	0	5.9	-0.0	0
WALP	1.7	264	161	0.9	0.9	0.0	0	1.5	-0.0	0

rmc = 0.03

TABLA 7

**Resultado numérico del programa EPI para el sismo teórico localizado en el punto
12.00 °S, 75.00 °W a una profundidad de 5 km.
Las estaciones corresponden al grupo 3
(siglas, ver Tabla 2)**

Sismo N° 415

Fecha: 31 Dic 1999 Hora Origen (GMT): 12h 11m 59.97s

Latitud: -11.9990 ± 0.3 km.

Longitud: -75.1002 ± 0.2 km.

Profundidad: 8.7 km ± 1.3 km.

Magnitud:

Intensidad:

Esta	Distan	Azm	Ain	TPCal	P-Seg	P-Res	W	S-Seg	S-Res	W
ATOC	55.9	147	114	9.4	9.3	-0.0	0	16.2	0.0	0
TBLA	62.2	146	114	10.4	10.4	0.0	0	18.0	0.0	0
QUIM	60.2	133	114	10.1	10.0	-0.0	0	17.4	0.0	0
HUAN	24.5	260	115	4.2	4.2	0.0	0	7.2	-0.0	0
RUND	49.4	137	114	8.3	8.3	0.0	0	14.3	-0.0	0
QUEL	73.3	136	113	12.3	12.2	-0.0	0	21.2	0.0	0
WALP	54.4	145	114	9.1	9.1	0.0	0	15.7	-0.0	0

rmc = 0.03

TABLA 8

**Resultado numérico del programa EPI para el sismo teórico localizado en el punto
12.40°S, 74.70°W a una profundidad de 5 km.
Las estaciones sísmicas corresponden al grupo 4
(siglas, ver Tabla 2)**

Sismo N° 783

Fecha: 31 Dic 1999 Hora Origen (GMT): 12h 12m 0.02s

Latitud: -12.4005 ± 0.1 km.

Longitud: -74.7994 ± 0.1 km.

Profundidad: 4.9 km ± 0.2 km.

Magnitud:

Intensidad:

Esta	Distan	Azm	Ain	TPCal	P-Seg	P-Res	W	S-Seg	S-Res	W
ATOC	3.0	223	149	1.0	1.0	0.0	0	1.7	0.0	0
TBLA	7.3	164	127	1.5	1.5	0.0	0	2.6	0.0	0
QUIM	12.0	72	119	2.2	2.2	0.0	0	3.8	0.0	0
RUND	8.7	7	124	1.7	1.7	0.0	0	2.9	-0.0	0
QUEL	19.9	115	116	3.4	3.4	-0.0	0	5.9	-0.0	0
WALP	1.8	265	160	0.9	0.9	-0.0	0	1.5	-0.0	0

rmc = 0.03

TABLA 9

**Resultado numérico del programa EPI para el sismo teórico localizado en el punto
12.00°S, 75.00°W a una profundidad de 5 km.
Las estaciones sísmicas corresponden al grupo 4
(siglas, ver Tabla 2)**

Sismo N° 415

Fecha: 31 Dic 1999 Hora Origen (GMT): 12h 11m 59.95s

Latitud: -11.9964 ± 0.3 km.

Longitud: -75.1023 ± 0.3 km.

Profundidad: 0.0 km ± 0.0 km.

Magnitud:

Intensidad:

Esta	Distan	Azm	Ain	TPCal	P-Seg	P-Res	W	S-Seg	S-Res	W
ATOC	56.1	147	113	9.4	9.3	-0.0	0	16.2	0.0	0
TBLA	62.4	146	113	10.4	10.4	0.0	0	18.0	0.0	0
QUIM	60.4	133	113	10.1	10.0	-0.0	0	17.4	-0.0	0
RUND	49.6	137	113	8.3	8.3	0.1	0	14.3	-0.0	0
QUEL	73.5	136	113	12.3	12.2	-0.0	0	21.2	0.0	0
WALP	54.6	145	113	9.1	9.1	0.0	0	15.7	-0.0	0

rmc = 0.03