

TÉCNICAS DE ANTENA SÍSMICA EN VOLCANOLOGÍA.

Introducción.

Una antena sísmica o *array* es un conjunto numeroso de sismómetros distribuidos en una superficie reducida. Los instrumentos utilizados deben tener características similares y la zona de despliegue debe ser lo más homogénea posible. La aplicación de las antenas se está utilizando ampliamente en el estudio de la sismicidad volcánica. La razón hay que buscarla en la facilidad de su despliegue y operación en comparación con las redes sísmicas tradicionales y especialmente en la posibilidad de caracterizar el temblor volcánico (*tremor*). Existen muchas modalidades de antenas, desde las que utilizan numerosos sensores de banda ancha, hasta las más sencillas que sólo emplean tres sensores de electromagnéticos de alta frecuencia.

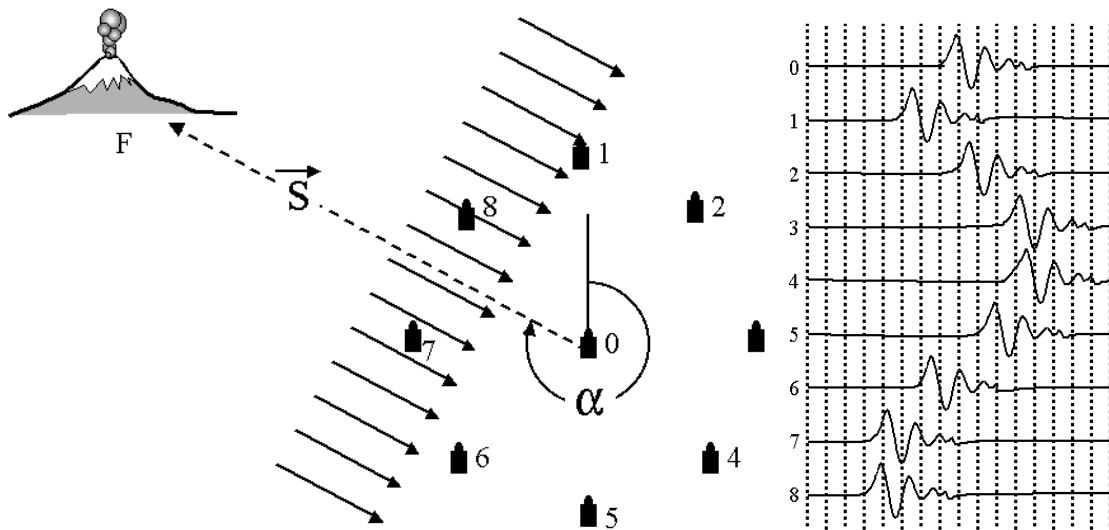


Figura 12-1 El principio de funcionamiento de una antena sísmica es caracterizar una señal sísmica partiendo del análisis simultáneo de los registros obtenidos por un número elevado de sensores. El dispositivo permite caracterizar la señal en función de un ángulo de incidencia α (azimut) y un vector S (lentitud) definido como inverso de la velocidad aparente del frente de ondas. La figura muestra una antena circular de 9 canales sobre el que incide una onda plana y el registro obtenido en cada canal.

Las técnicas de localización de las antenas sísmicas suministran, como primer dato, el valor de la velocidad aparente con que las ondas atraviesan la superficie de las antenas, y el azimut epicentro-antena de la fuente sísmica. Si se combina este dato con el de datos de lectura P y S y trazado del rayo, entonces es posible determinar la posición del foco de estos terremotos. Para las otras señales, en las que se carece de fases reconocibles, una antena sólo da información de la dirección de la fuente y de la propagación de las ondas. Si se usan dos antenas combinadas, es posible determinar la posición de la zona epicentral. Esta determinación es imposible usando una red sísmica convencional.

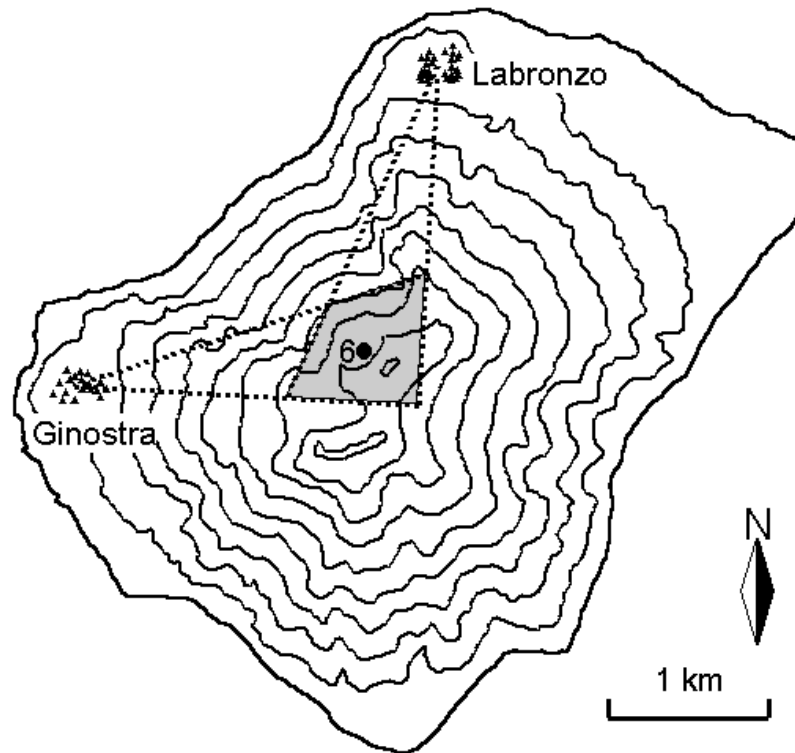
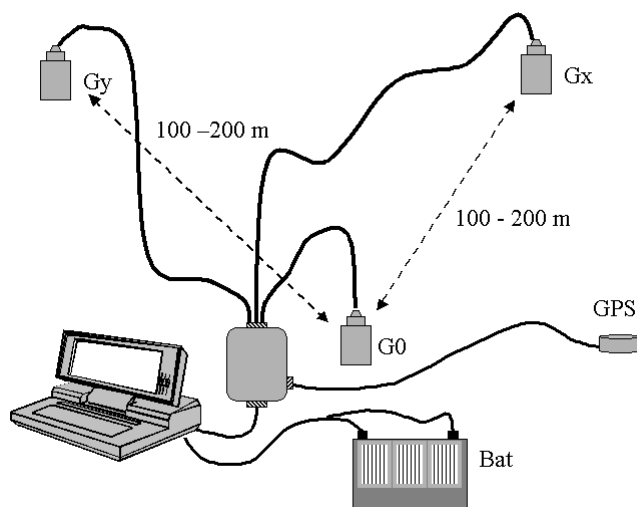


Figura 12-2. Determinación de la zona fuente mediante dos antenas sísmicas. La figura corresponde a un experimento llevado a cabo en el volcán Stromboli por el Observatorio Vesubiano, el Instituto Andaluz de Geofísica y el Departamento de Volcanología del CSIC.

Técnicas de antenas sísmicas

Tradicionalmente el registro sísmico se ha realizado mediante redes sísmicas, formadas por numerosas estaciones con enlaces telemétricos, distribuidas de forma que cubran todo el entorno de la zona donde se producen los eventos. Este tipo de redes se utiliza normalmente para el seguimiento de las crisis volcánicas, sin embargo, el despliegue de una red sísmica de este tipo alrededor del volcán en muchas ocasiones no es posible, especialmente por causa de la topografía, ausencia de vías de comunicación o falta de tiempo. La puesta en operación de los enlaces telemétricos tampoco resulta fácil de conseguir en poco tiempo. Durante la crisis de un volcán es necesario tener acceso en tiempo real a los datos registrados por cada una de las estaciones que configuran la red. En general, hay que acudir a varios repetidores para hacer llegar la señal de las distintas estaciones al centro de registro. La contaminación del espectro radioeléctrico hace que los registros obtenidos en estas circunstancias sean habitualmente de moderada calidad. La pérdida de uno de los repetidores puede suponer que un grupo importante de estaciones quede inoperativo. El fundamento del método de análisis de los registros obtenidos en una red sísmica para el estudio de la sismicidad de una zona se basa en identificar las distintas fases de los eventos y determinar las diferencias de tiempo. Partiendo de estas diferencias, se procede a la localización del foco. La máxima precisión en la localización, con los algoritmos tradicionalmente usados basados en técnicas de mínimos cuadrados, sólo se obtiene si el evento se produce dentro de la red. La pérdida de un grupo de estaciones hace perder mucha precisión a la red.

Figura 12-3. Una antena sísmica está constituido por una serie de geófonos (G) unidos por cables a un sistema de conversión analógica digital, un computador para almacenaje de los datos y un sistema de alimentación (Bat). Es conveniente disponer también de un receptor GPS.



La solución es utilizar una metodología alternativa a las redes sísmicas como los dispositivos de antena, es decir un conjunto de sensores sísmicos distribuidos con una adecuada geometría en una limitada extensión de terreno. Ahora, el estudio de los registros no se realiza individualmente, estación por estación, sino simultáneamente y utilizando técnicas de análisis de señales. En un dispositivo de antena, al tener muy próximos todos los sensores, se pueden utilizar enlaces de mucha mayor velocidad que en las permitidas con telemetría radio, lo que permite aumentar la frecuencia de muestreo y la resolución de los conversores analógico digital. Además, las pérdidas de datos por interferencias son casi nulas y también se posibilita un mejor mantenimiento del equipo. Finalmente, al estar concentrados todos los equipos en una zona limitada es mucho más fácil de vigilar y por ello más segura frente al vandalismo.

Desarrollo de un sistema de antena sísmica

Un antena sísmica está compuesta por una serie de sensores de los que debe conocerse perfectamente su respuesta individual. Unos enlaces, generalmente por cable, uno o varios sistemas de conversión analógica digital y un ordenador de adquisición de datos. Como elemento auxiliar se incluye un sistema de tiempo absoluto y el sistema de alimentación. Para simplificar la operación, cuando el número de sensores aumenta, es preferible adoptar una configuración con varias unidades de adquisición de datos sincronizadas. De esta forma, se evita tener que establecer largos enlaces múltiples entre los sensores y el sistema de registro. En estos casos, si se desea el proceso en tiempo real, hay que incluir otra unidad, con mayor capacidad de cálculo que centralice los datos de todas las sub-unidades. Estos enlaces deben ser de alta velocidad, pero actualmente no suponen un excesivo costo adicional, pues son unidades estándar de la industria informática. Al ser toda la telemetría por cable se simplifica el problema de la alimentación de todo el sistema.

La técnica de antena sísmica se basa en el análisis digital simultáneo de las señales registradas por todos los sensores. Además se debe conocer perfectamente la respuesta de cada uno de los sensores y, especialmente y con alta precisión, la geometría de la antena. Cuando un frente de ondas alcanza una antena, los distintos sensores van

recibiendo la señal con pequeñas diferencias de tiempo, función de las distintas distancias que los separan del foco. Las pequeñas diferencias de fase que aparecen en los registros permiten determinar la dirección y distancia de fuente. La velocidad aparente con que se propaga el paquete de ondas determina la profundidad del foco. Esta técnica también se podría aplicar con redes convencionales, sin embargo, en el caso de la antena, el ruido presente en todos los sensores es coherente y por consiguiente cancelable, cosa que no ocurre en el caso de una red. Por otro lado, las diferencias de estructura entre las estaciones de la red son difícilmente evaluables, mientras que la antena se dispone siempre de forma que sus sensores estén desplegados sobre la misma estructura. Además, para poder analizar la propagación de todo el paquete de ondas a través de la antena, es necesario que las longitudes de onda que intervienen sean mayores que las dimensiones de la antena, puesto que de otro modo se presentan fenómenos de aliasing espacial, análogos a los que aparecen en el dominio temporal, cuando la señal muestreada posee componentes de frecuencias más altas que la frecuencia de muestreo.

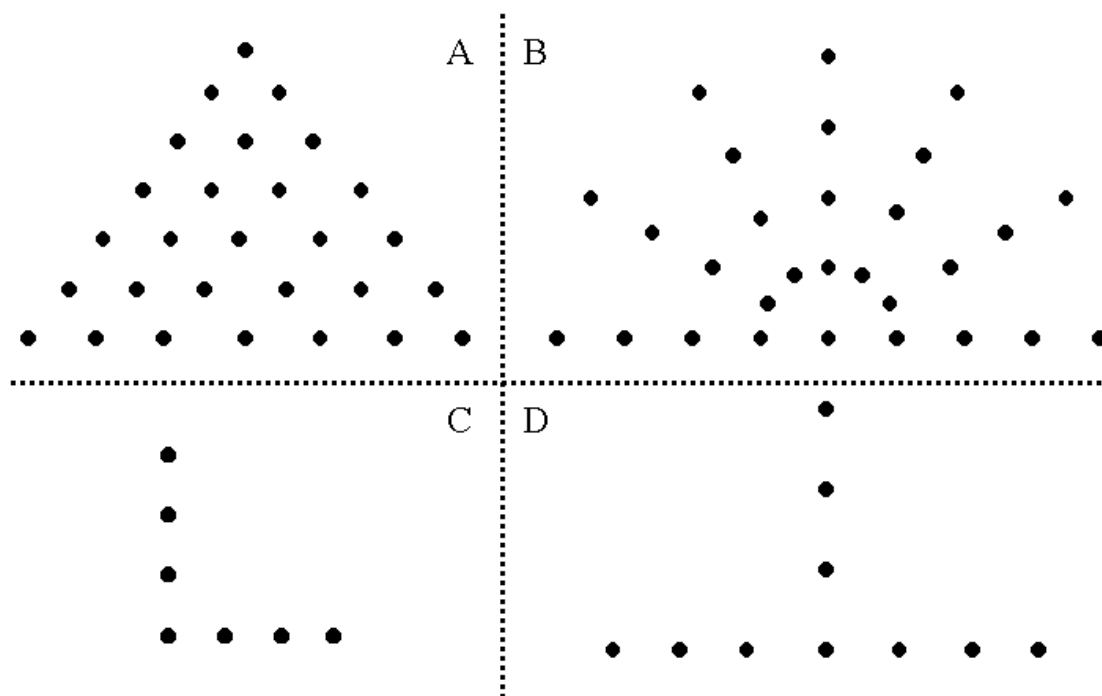


Figura 12-4. Los sensores de la antena pueden disponerse de distintas formas, en triángulo (A), en círculo (B), etc. Sin embargo, cuando se dispone de pocos sensores es preferible adoptar geometrías más sencillas en L (C) o en T (D) que permiten cubrir mayores distancias entre sensores.

Los retardos esperados son función de la distancia entre sensores, así, para una distancia media de 100m entre sensores, y una velocidad aparente de 2 km/s, el retardo máximo que se puede esperar es de sólo 50 ms. Si se quiere una precisión del 1% significa que se debe mantener los errores por debajo de 0.5 ms. La necesidad de poder alcanzar esta resolución condiciona el diseño de todo el sistema, especialmente la generación de marcas de tiempo sincrónicas en todos los equipos y poder trabajar a frecuencias de muestreo muy elevadas. El conocimiento de la geometría de la red deberá conocerse con la misma precisión, así como la respuesta en tiempo de los sensores y electrónica asociada. Determinar cual es la geometría óptima del dispositivo de antena en una determinada aplicación es la primera cuestión a resolver. La geometría a utilizar vendrá en primer lugar condicionada por el espacio disponible donde se pueda desplegar la antena, hay que pensar que se requiere una zona extensa y lo más regular posible,

además de contar con facilidades de acceso y seguridad. Después, intervienen las características de las señales a registrar, su contenido espectral y su origen.

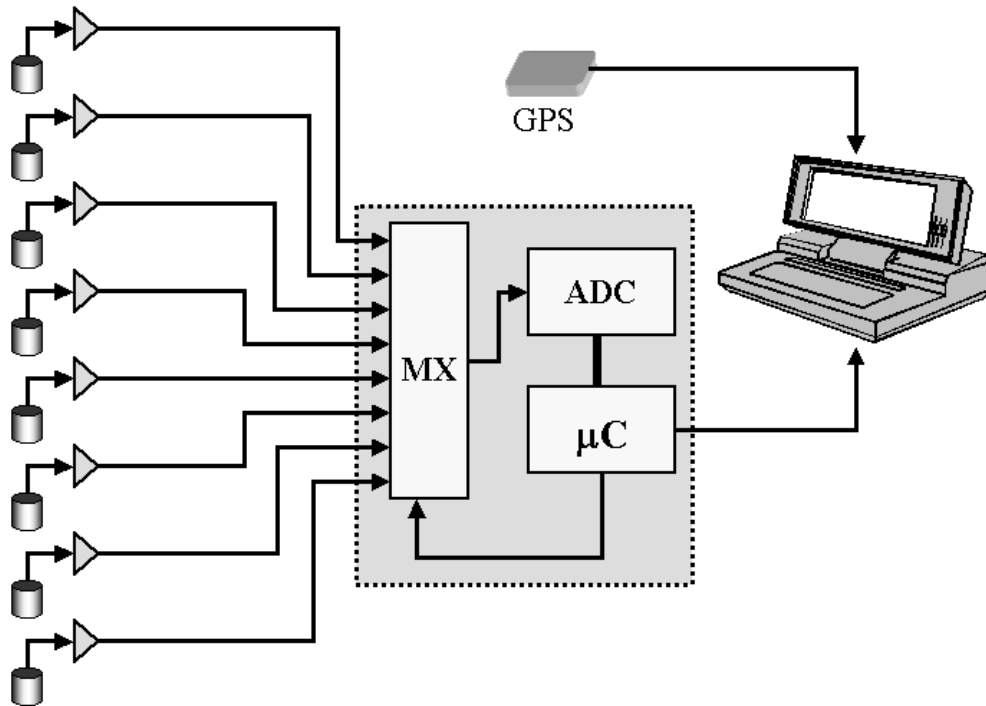


Figura 12-5. Módulo de antena de 8 canales que utiliza un único convertor analógico digital de 16 bits de alta velocidad para medir consecutivamente todos los canales de entrada. Un microcontrolador gestiona la adquisición y las transferencias con el computador.

En ocasiones, el ruido presente en la zona será otro punto a considerar. Los dispositivos en T o en L permiten cubrir mayor número de longitudes de onda. Inicialmente se utilizaron dispositivos con geometrías regulares, con un muy elevado número de geófonos. Al disminuir el número de geófonos, manteniendo la misma resolución en cuanto a longitudes a onda, es necesario acudir a distribuir los sensores en forma no regular, ya que de otro modo el *aliasing espacial* nos obligará a limitar el espectro. En general se combinan grupos de antena para cubrir un mayor número de ondas. En estos casos es imprescindible la sincronización de todas las unidades de registro con precisiones mejores a una muestra, pues de otro modo no es posible correlacionar unas señales con otras. Es importante tener en cuenta que la simple transmisión de un pulso por un cable ya introduce un retardo que según sean las condiciones del cable puede llegar a ser importante. La utilización de sistemas GPS, siempre que todas las antenas tengan visibilidad a la misma constelación de satélites, puede ser una posible solución.

Módulo electrónico

Una antena sísmica puede concebirse de múltiples formas, la más sencilla consiste en disponer de muchas estaciones autónomas que se despliegan en un reducido espacio y todas ellas con un sistema de sincronismo temporal. Con esta configuración no es posible tener información en tiempo real, además de requerir una elevada inversión en sistemas de registro y de sincronismo temporal. La solución extrema sería utilizar una única unidad de registro y multitud de sensores conectados a ella, con un sistema de

tiempo local. Esta configuración permite tener información en tiempo real, pero exige gran capacidad de almacenamiento y una velocidad de cálculo muy elevada.

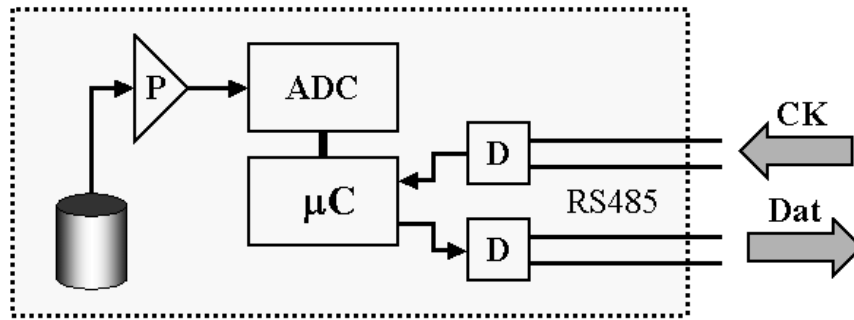


Figura 12-6. Actualmente se utiliza un convertor delta sigma independiente para cada canal que se monta en la misma caja que contiene el geófono y su circuito de ecualización. Se utiliza una interfase serie síncrona de forma que todas las unidades transmiten los datos controlados por el mismo reloj CK.

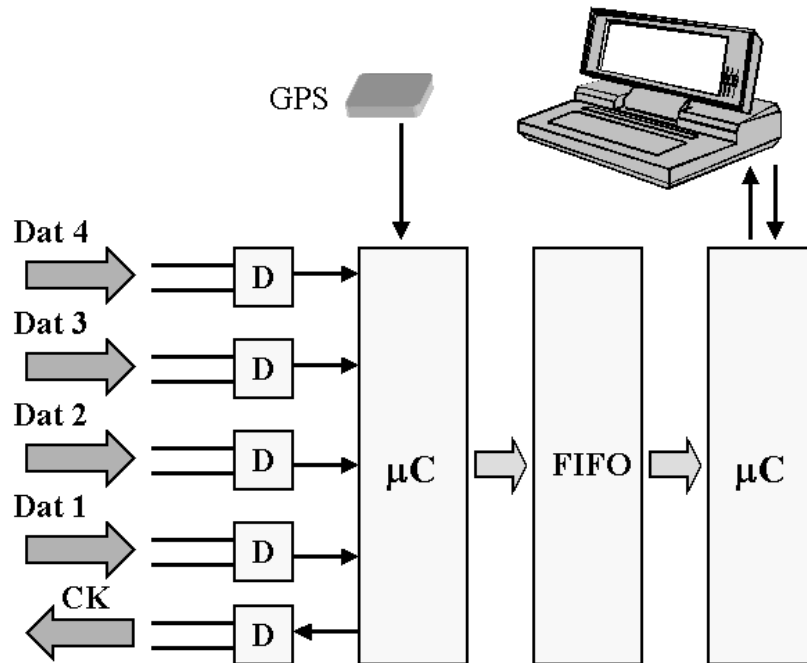


Figura 12-7. Un módulo recibe sincrónicamente los datos procedentes de los distintos sensores y los transfiere al computador de almacenamiento. Para facilitar esta operación, es conveniente intercalar una memoria FIFO y otro microcontrolador. De esta forma se pueden utilizar sistemas operativos como el Windows, que no están concebidos para este tipo de aplicaciones.

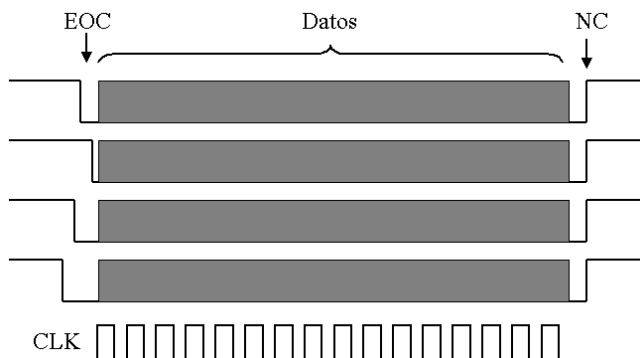


Figura 12-8. Cuando cada convertor dispone de un dato para su transmisión pone a cero la línea de salida, una vez todos los convertores han finalizado (EOC), el microcontrolador envía los 16 pulsos de reloj (CLK), se transfieren todos los datos y se inicia otro ciclo de medida (NC), subiendo las líneas de datos a 1.

Una solución intermedia, que además es muy flexible de operación, es disponer una serie de unidades de registro, cada una de ellas con capacidad máxima para 8/16 canales dotadas con su sistema de tiempo absoluto de precisión. De esta forma, los sistemas de adquisición no requieren elevadas prestaciones y se puede contar con una pequeña antena que opera en tiempo real mientras que todo el conjunto lo hace en modo diferido. Además, su despliegue en el campo es mucho más fácil, al poderse adaptar a las características del espacio disponible.

El computador, el módulo de adquisición de datos, el receptor GPS y la fuente conmutada deben protegerse de las inclemencias del tiempo mediante una caja a prueba de agua y térmicamente bien aislada. La entrada de los cables debe hacerse mediante pasamuros o sellarse con un adhesivo. Mucho cuidado con cierto tipo de siliconas, con elevado contenido en ácido acético que produce importantes corrosiones en los circuitos impresos. Si se utiliza un sellador, esperar que se seque completamente con la caja abierta bien ventilada. Se pueden conseguir pasamuros en plástico muy económicos que permiten eliminar los costosos conectores herméticos, conectando todos los cables mediante tornillos directamente a sus respectivos módulos.

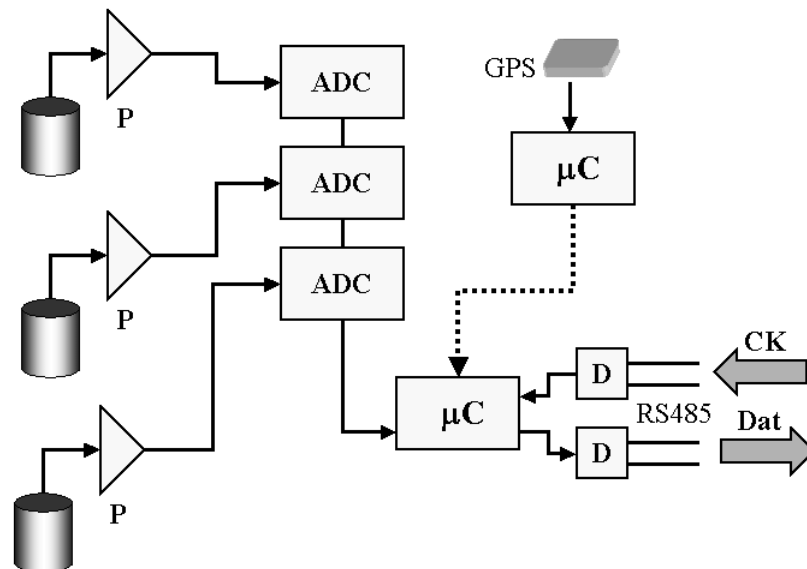


Figura 12-9. Una solución intermedia, muy cómoda de operar, es construir módulos de tres canales, que pueden ser los mismos que se utilizan en estaciones de tres componentes, a los que sólo es necesario modificar la interfase de salida para que puedan operar en modo síncrono y a mayor velocidad de transferencia. En algunos casos requerirán también el receptor GPS.

La conexión de los distintos módulos debe hacerse con cuidado, utilizando cables gruesos para todas las alimentaciones y evitando que se produzcan lazos de masa. Toda la electrónica debe estar protegida contra inversiones de polaridad, sin embargo, la conexión de una línea positiva a masa provocará un cortocircuito a la batería, que destruirá seguramente parte del cableado. También todas las entradas deberán estar protegidas contra transitorios de alta tensión, para lo cual se pueden utilizar dispositivos TRANSZORB. La antena del GPS, deberá colocarse de forma que tenga visión sobre el máximo horizonte posible. Los sensores deberán enterrarse lo más posible, lo cual no siempre es tarea fácil. Deberá cuidarse especialmente que no le pueda entrar agua al

sensor o al conector. Una buena precaución, además de sellar perfectamente todas las juntas y de proteger todos los tornillos, es encerrarlos bien dentro de una bolsa de plástico, que se atará fuertemente alrededor del cable. Todo ello se sujeta con cinta adhesiva.

Software para la operación de la antena

El programa de adquisición es una adaptación del habitualmente utilizado en estaciones y redes sísmicas digitales, basándose en un algoritmo del tipo STA/LTA, al que se le ha añadido una función del tipo despertador para poder registrar de acuerdo con una tabla de tiempos establecida. Se obtiene dos ficheros con extensiones DTS y SAD, el primero recoge toda la información de cabecera, mientras que el segundo es un fichero binario con los datos de todos los canales multiplexados en tiempo. El inicio del registro es siempre en segundo exacto. El tiempo indicado en la cabecera corresponde a la primera muestra. Para evitar confusiones entre distintos equipos el identificativo de los ficheros responde al siguiente formato:

JJHHMMX.***

Donde JJJ es el día juliano del año en curso, HH la hora y MM el minuto correspondiente al inicio del registro. X es una letra que identifica el equipo que ha registrado el evento. *** es la extensión DTS para la cabecera y SAD para los datos en binario. La operación de un dispositivo de antena exige una perfecta sincronización de los relojes y utilizar un muestreo lo más elevado posible ya que de otro modo la correlación entre las distintas señales será muy difícil que pueda poner de manifiesto los pequeños retardos existentes entre las distintas llegadas. Por ello es necesario utilizar siempre un sistema de tiempo GPS, pues cualquier otro no puede garantizar sincronismos entre estaciones remotas inferiores a 0.1 ms. El programa de adquisición es del mismo tipo que el utilizado para la red sísmica, de la que se diferencia en que ahora debemos operar a una frecuencia de muestreo de por lo menos 200Hz. Además, debe existir la posibilidad de realizar registros simultáneos con distintas antenas, para ello se incorpora un fichero que contiene las horas de inicio de registro y las duraciones del mismo. Para mejor control de los registros se incorpora al fichero de cabecera de cada registro la información referente al estado del sistema GPS.

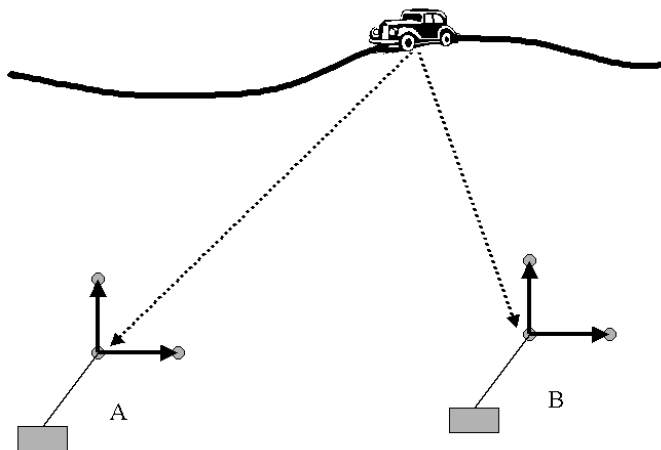


Figura 12-10: La técnica de localización con dos antenas de tres canales consiste en obtener para cada antena el correspondiente azimut de la señal y proyectar ambos. Deberá tenerse presente que al moverse la fuente el azimut es cambiante en el tiempo y que los tiempos de llegada son distintos para cada dispositivo.

Instalación y operación

Se procederá a desplegar los dispositivos, con una separación entre geófonos comprendida entre 50 y 200 m. Cuando se dispone de pocos geófonos se elegirá un dispositivo en L que permite una mayor distancia entre sensores y simplifica la interpretación de los datos. El sistema de registro se situará a más de 100 m del geófono más próximo para evitar que el movimiento de los operadores perturbe demasiado la señal registrada. Una vez elegido el lugar de la instalación, se localizará mediante GPS el emplazamiento, y se procede a marcar el centro del dispositivo y los puntos donde se situarán los geófonos. Seguidamente se despliegan los cables, se sitúan y conectan los geófonos y se comprueba con el polímetro que la conexión y los cables estén correctos. Se debe prestar mucha atención al emplazamiento de los geófonos, midiendo cuidadosamente sus posiciones y respetando las polaridades. Se conecta el módulo central cuidando que el orden de los geófonos sea el correcto. Se conecta la antena del sistema GPS, el computador y los cables de alimentación. Se revisan todas las conexiones, se comprueban las polaridades y se alimenta el sistema. Para esta operación es conveniente utilizar una *lista de comprobación*. Deberá hacerse una reseña del emplazamiento y un croquis de la instalación. Para facilitar el conexionado de los geófonos y evitar tensiones en los cables, es preferible situar primero los geófonos y colocar en el centro de la hipotenusa el sistema de registro. Se comprueba que la señal sea correcta en los tres canales, ajustando la amplificación en caso necesario. Deberá existir coherencia entre las señales, estando todas ellas en fase. Esto es fácilmente observable en las componentes de baja frecuencia del ruido. Se llevará un cuaderno de incidencias, anotando los disparos que se produzcan, con un comentario sobre la posible fuente.

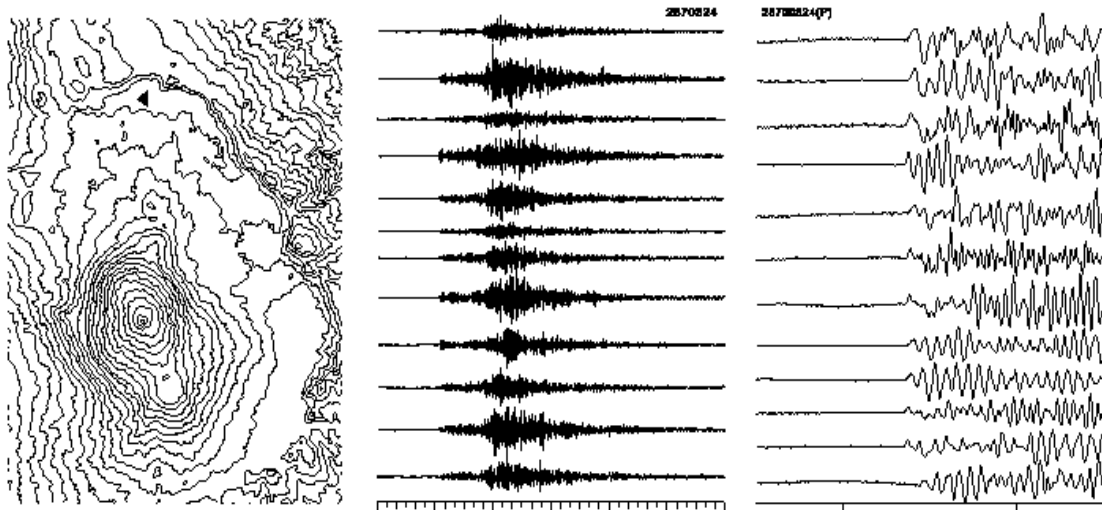


Figura 12-11. Se muestra el emplazamiento de una antena en el interior de la Caldera de Las Cañadas del Teide (Tenerife, Islas Canarias). El emplazamiento de la antena se eligió para poner de manifiesto la estructura de colapso de la caldera. Los registros sísmicos corresponden a un sismo de magnitud 2.4 ocurrido a 30 Km. de distancia entre las islas de Tenerife y Gran Canaria. Obsérvese la gran influencia que ejercen las diferencias de estructura existentes debajo de cada uno de los sensores. Las estaciones más próximas a la pared de la caldera registran con mayor amplitud y muestran una onda P nítida, mientras que las situadas más al interior de la caldera muestran menor amplitud y la onda P aparece contaminada por una onda estacionaria creada localmente.

Análisis de los registros

Las técnicas de localización de las antenas sísmicas están basadas en la búsqueda de la máxima coherencia de la señal registrada en las estaciones sísmicas de la antena. Puesto que se usan paquetes de ondas más o menos largos, para estimar esta coherencia no es necesaria la identificación de las primeras llegadas impulsivas. Si entre las estaciones que forman la antena hay alguna de tres componentes y se conoce con algún detalle la estructura del terreno, se puede conocer además el ángulo de incidencia de la señal. Este ángulo también se puede determinar por simples razones trigonométricas si se conoce la velocidad aparente y la velocidad teórica de la onda. En el caso de poder identificar más de una fase y conocer su velocidad media de propagación es posible estimar la distancia hipocentro - antena e incluso inferir su profundidad focal.

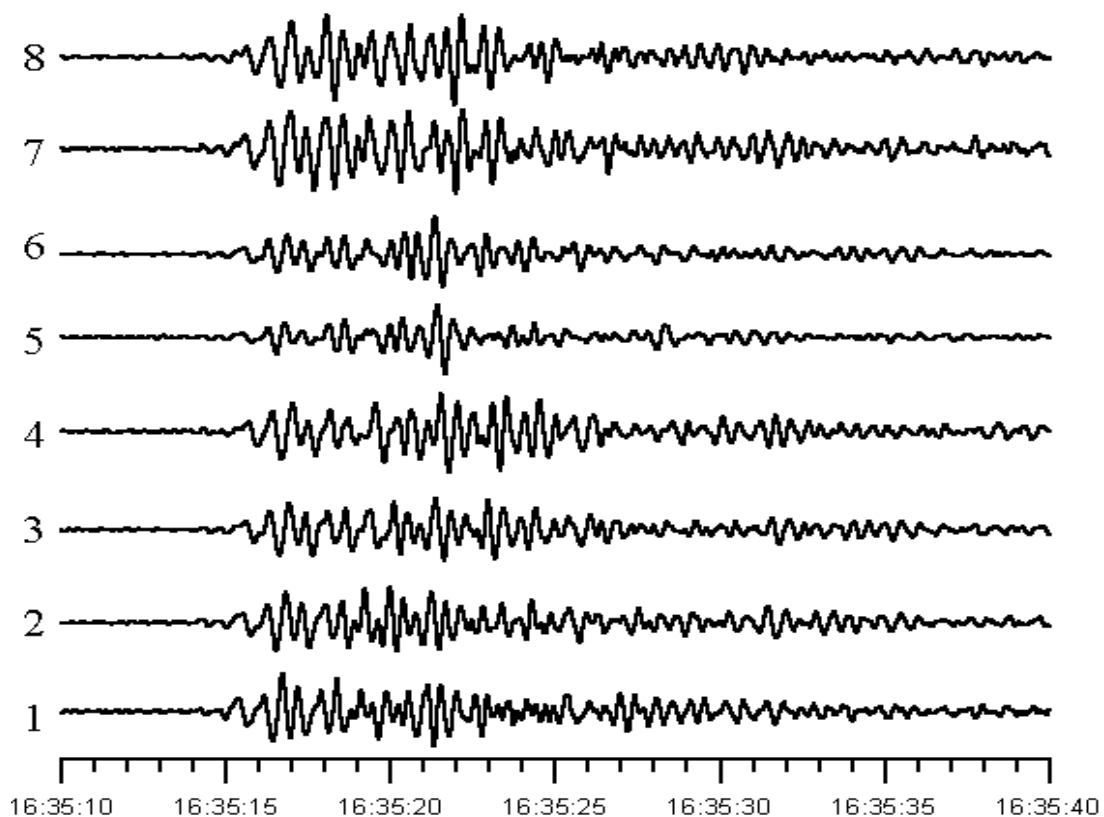


Figura 12-12. Ejemplo de registro sísmico obtenido con una antena. Obsérvese la coherencia en fase entre los distintos canales. Se trata de una antena de ocho canales situado en la base del volcán Arenal (Costa Rica). Se adoptó un dispositivo en cruz, con los canales 1, 2, 3, 4 en dirección al cráter activo, siendo el canal 1 el más próximo. Los canales 5, 6, 7, 8 son transversales. La distancia entre geófonos es de 100 m, operándose a 200 muestras por segundo. Registro obtenido el 13-4-1997.

Se realiza primero una inspección visual en la pantalla del computador, seleccionándose aquellos que presenten una mejor coherencia entre señales y hayan sido obtenidos por los dos dispositivos. Seguidamente se procede a la descomposición de las señales seleccionadas en varias bandas mediante un filtrado digital. Para cada señal filtrada deberán seleccionarse varios fragmentos, cada uno de ellos con dos o tres oscilaciones de la onda predominante y que presenten buena coherencia entre los tres canales. Se debe calcular el retardo entre los distintos canales utilizando varias técnicas y con ello

determinar el azimut y la velocidad aparente. El proceso se repite para cada una de las bandas en las que la señal posea suficiente energía.

La búsqueda de la máxima coherencia se puede realizar a través de diversas técnicas, tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia. En el dominio del tiempo, una de las técnicas más comunes es la denominada de correlaciones cruzadas *Zero Lag Cross Correlation* ZLCC. Este método consiste en calcular la coherencia entre las distintas señales para todo azimut y velocidad posible. Para ello, se construyen primero una serie de tablas que dan el desplazamiento de cada traza en función de cada azimut y velocidad. Estas tablas sólo dependen de la geometría de la antena y por ello se calculan una sola vez. Una vez seleccionada la señal y una estación de referencia, se calcula la coherencia en función de sucesivos azimut y velocidades aparentes, desplazando los intervalos de señal en función de los tiempos de llegada teóricos. Aquella dirección y velocidad aparente que presente la mayor coherencia se puede considerar como la dirección de incidencia. Hay que asegurarse de que la coherencia obtenida sea suficientemente significativa. Si esta técnica se realiza a lo largo de la señal es posible no sólo estimar el origen de la fuente, sino su duración en función de la estabilidad del azimut foco-estación. Por otra parte, también se puede usar para identificar la posición de alguna heterogeneidad lateral suficientemente grande para producir ondas que sufren un proceso de *scattering* con suficiente energía. El mayor inconveniente que presenta esta técnica es la gran cantidad de tiempo de computación requerido y la sensibilidad de la coherencia en función de la longitud de la ventana. La función de correlación entre dos señales f y g , se define del siguiente modo

$$R(\tau) = \langle f(t) g^*(t + \tau) \rangle$$

donde $\langle \cdot \rangle$ representa el promedio temporal. Si registramos una señal $u(\mathbf{r}, t)$, que se propaga con un cierto vector lentitud \mathbf{s} , en dos estaciones de la antena de modo que tengamos $u_j(t) = u(\mathbf{r}_j, t)$ y $u_k(t) = u(\mathbf{r}_k, t)$, su correlación será máxima cuando el retraso τ coincida con el tiempo efectivo que la onda invierte en llegar de la estación j a la k , τ_{jk} , que vale

$$\tau_{jk} = \vec{s} \cdot (\vec{r}_j - \vec{r}_k)$$

El método consiste en suponer que el vector lentitud toma valores dentro de una malla en la que s_x y s_y van desde $-s_{\text{máx}}$ hasta $s_{\text{máx}}$ con un cierto incremento s_{inc} . Calculamos las correlaciones de todas las trazas mediante la expresión

$$R_{jk}(\tau_{jk}(\vec{s})) = \langle u_j(t) u_k^*(t + \tau_{jk}(\vec{s})) \rangle$$

donde $\tau_{jk}(\mathbf{s})$ es el retraso que la onda tendría entre las dos estaciones si se propagara con vector lentitud \mathbf{s} . Definimos el coeficiente de correlación medio normalizado como

$$\rho(\vec{s}) = \frac{1}{N} \sum_{j,k=1}^N \frac{R_{jk}(\tau_{jk}(\vec{s}))}{\sqrt{R_{jj}(0) R_{kk}(0)}}$$

El coeficiente de correlación no alcanza nunca la unidad, debido principalmente a la presencia de ruido sísmico y a la distorsión de la señal. La presencia de efectos de sitio muy locales puede provocar que la señal que registramos en diferentes estaciones de una antenna no sea exactamente la misma. Al máximo de este coeficiente de correlación dentro del plano de lentitud se le conoce con las siglas *MACC Maximum Average Cross Correlation*. En muy pocos casos se obtiene un azimut y un vector de lentitud bien definidos, en esos casos se representan los valores obtenidos para la coherencia en función de cada azimut y lentitud, con lo que se obtiene una superficie que muestra las posibles fuentes y su importancia relativa. Este método pone de manifiesto la existencia de problemas en la instalación de la antenna, que pueden ser debidos a la estructura del subsuelo o a fallos instrumentales.

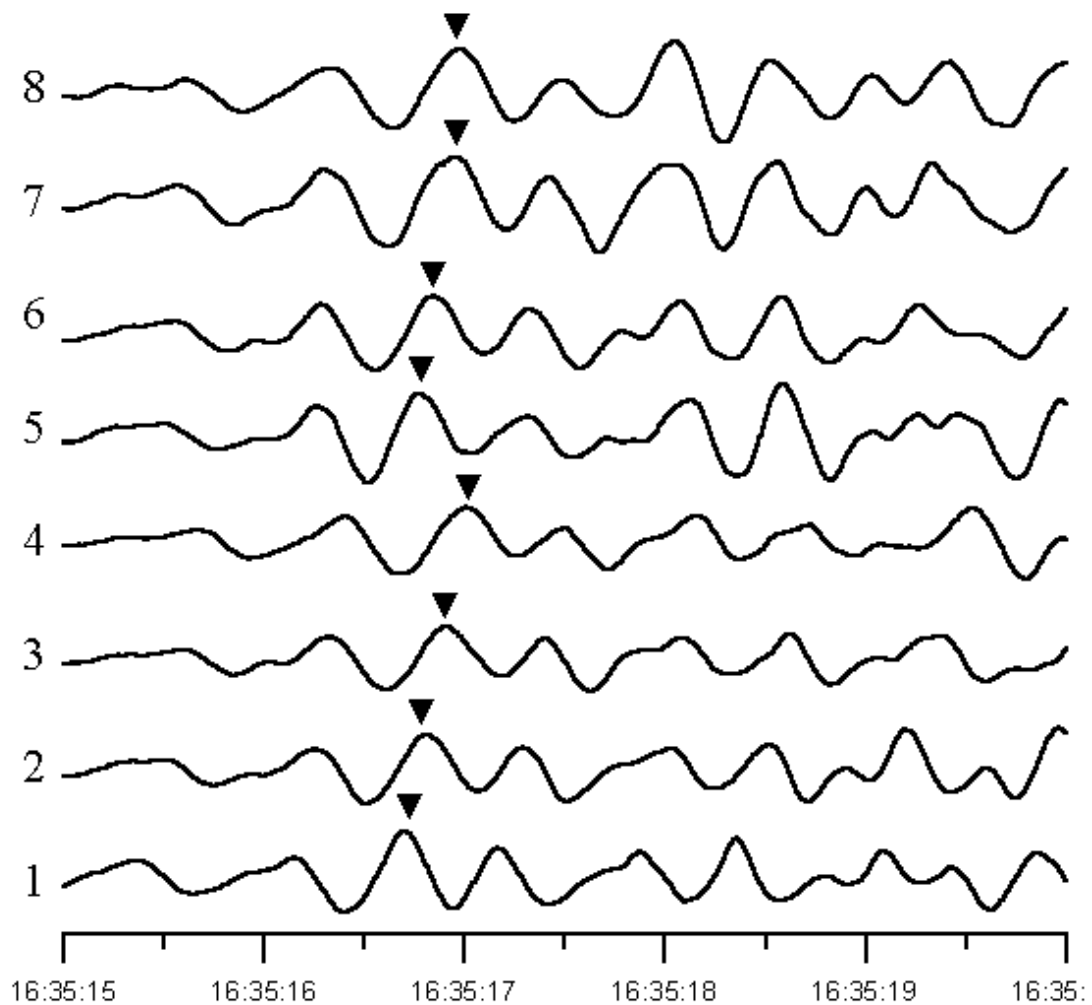


Figura 12-13. Detalle del registro anterior donde se puede apreciar el retardo existente entre los distintos canales para una misma fase.