

USO DE ANTENAS SÍSMICAS EN AMBIENTES VOLCÁNICOS

M. Abril, J.M. Ibáñez

Instituto Andaluz de Geofísica. Universidad de Granada. Campus de Cartuja s/n. 18071 Granada

INTRODUCCIÓN

Una antena (o *array*) sísmica es un conjunto numeroso de sismómetros distribuidos en una superficie reducida, según una configuración que puede ser ordenada o aleatoria. Por tanto, una de las características fundamentales de las antenas sísmicas es la distribución densa de estaciones, que deben tener características instrumentales conocidas y lo más parecidas posibles, además de un muestreo sincronizado en todas ellas y una homogeneidad en el terreno de despliegue (figura 1).

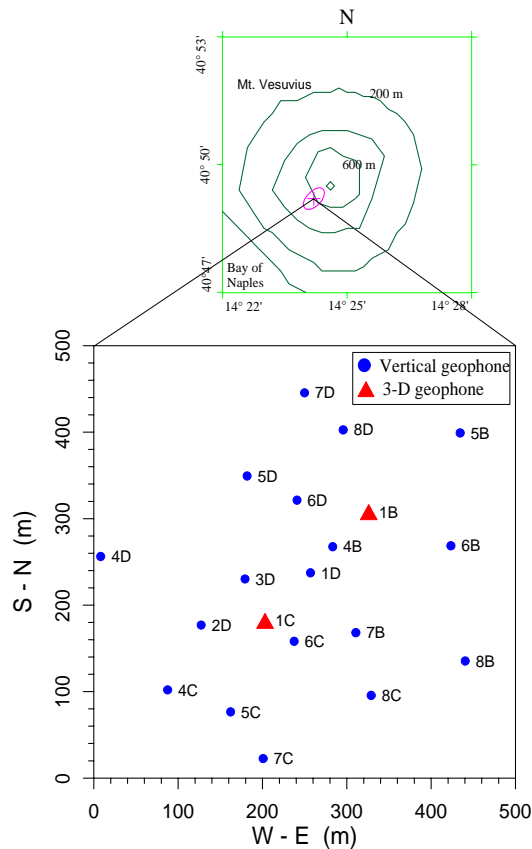


Figura 1.- Configuración utilizada en una antena sísmica desplegada en el volcán Vesubio en 1998.

Hoy en día el uso de las antenas sísmicas para el estudio de la sismicidad volcánica comienza a estar muy extendido. En ambientes volcánicos aparecen una serie de señales sísmicas - como son el tremor volcánico o los eventos de largo periodo- donde la fuente de los mismos no puede ser localizada siguiendo los procedimientos asociados a las redes sísmicas clásicas. Las antenas sísmicas (y las técnicas de análisis derivadas de ellas) permiten, entre otros estudios, la determinación y el seguimiento de la evolución espacio-temporal de la zona fuente de estas señales asociadas a movimientos de fluidos.

Como ejemplo de la versatilidad de las antenas sísmicas podemos citar el volcán Kilauea (Hawaii), en el que diversos experimentos con distintas antenas y diversas configuraciones han servido para estudiar, entre otras cosas, la estructura interna del sistema volcánico, la composición del tremor volcánico (ondas Lg y/o Rg) y la localización y características de las fuentes de señales de eventos de largo periodo y terremotos -utilizando una o, simultáneamente, dos o tres antenas-.

Además, estos estudios se han llevado a cabo en distintas bandas de frecuencia, desde corto periodo hasta ultra largo periodo (Ferrazzini et al., 1991; Ferrazini y Aki, 1992; Goldstein y Chouet, 1994; Chouet, 1996).

Otros volcanes que han sido estudiados de manera exhaustiva utilizando las antenas sísmicas son el Stromboli (Chouet et al., 1997; Saccorotti et al., 1998), Etna (Del Pezzo et al., 2000), Vesubio (Del Pezzo et al., 1999) todos en Italia, Teide en España (Del Pezzo et al., 1997; Almendros et al., 2000), Masaya en Nicaragua (Metaxian et al., 1997), o la isla volcánica de Decepción en la Antártida (Ibáñez et al., 1997; Almendros et al., 1997, Ibáñez et al., 2000). En todos estos volcanes se han aplicado diversas configuraciones y número de antenas sísmicas, con el fin de estudiar las características de la fuente sismo-volcánica y de su estructura.

ANTENAS FRENTE A REDES SÍSMICAS CONVENCIONALES

Una red sísmica convencional está compuesta por varias estaciones sísmicas emplazadas a lo largo de una región más o menos extensa (desde decenas a miles de km²), y

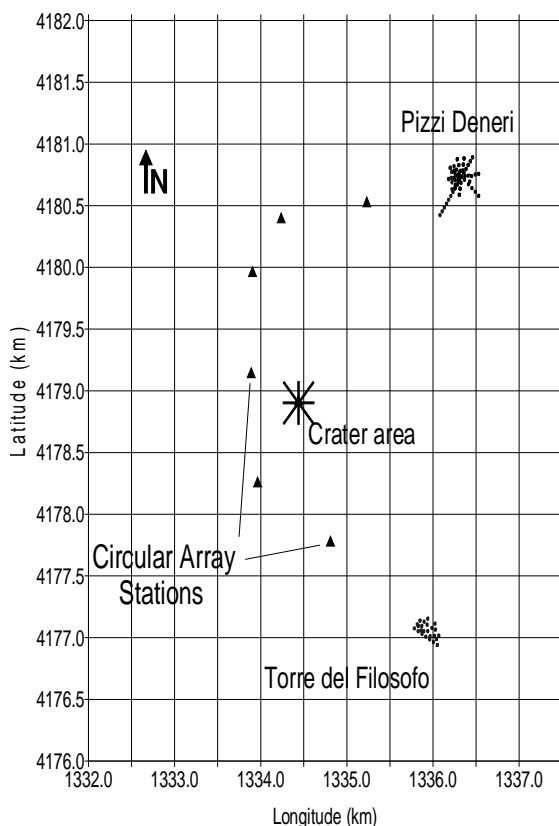


Figura 2. Ejemplo de situación idónea para el estudio sísmico de un volcán: combinación de dos antenas sísmicas y una red clásica en torno a la zona de interés. Combinación usada en una campaña en el volcán Etna en Septiembre de 1999.

preferiblemente en torno a la zona donde se espera que se produzcan las señales sísmicas (zona sismogénica). Este tipo de configuración es el que se usa de manera extendida para estudiar la sismicidad de una región. Sin embargo, el uso de redes sísmicas en áreas volcánicas presenta serias dificultades. Esta configuración está pensada para el estudio de terremotos, en los cuales es posible identificar la llegada de diversas fases sísmicas (ondas P, S, superficiales,...). Tal como se ha dicho (Ibáñez y Carmona, este volumen), un volcán no sólo genera este tipo de señales, sino que aparecen otras asociadas a la dinámica de los fluidos, en donde estas fases o no son fácilmente identificables, o ni siquiera existen. Las antenas sísmicas (y las técnicas derivadas de ellas) permiten la determinación de la posición de la fuente de estas otras señales que no son terremotos propiamente dichos.

Por otra parte, una red sísmica requiere que la zona de despliegue de estaciones sea a lo largo de toda la región volcánica, y, preferentemente, en torno a la zona de interés. En muchas regiones la orografía, la vegetación, la fauna y la

propia actividad del volcán dificultan tanto el despliegue como el mantenimiento de la instrumentación. Las antenas sísmicas, al sólo necesitar una o dos pequeñas superficies de despliegue, pueden ser operadas con mayor facilidad.

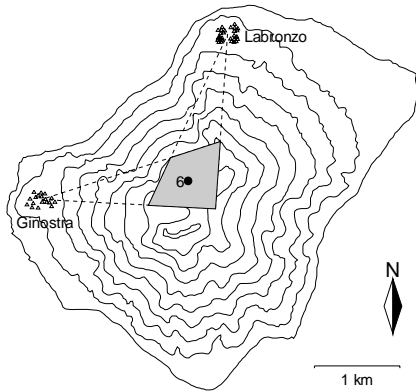


Figura 3. Ejemplo de la localización de un evento explosivo y determinación del error mediante el uso combinado de dos antenas en la isla de Stromboli.

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 sola antena sólo da información de la dirección de la fuente y de la propagación de las ondas. Si se usan combinadamente dos de ellas, como se muestra

en las figuras 2 y 3, entonces es posible determinar la posición de la zona epicentral. Esta determinación es casi imposible usando una red sísmica convencional.

Las redes sísmicas, por su parte, tienen otras características interesantes para su aplicación en entornos volcánicos. En primer lugar, si las estaciones de la red se disponen en torno al volcán, permiten una localización más precisa de los terremotos asociados al proceso volcánico, así como la determinación del mecanismo de fuente de un modo más simple que utilizando antenas. Al igual que con las antenas, es posible realizar estudios de polarización de las ondas, siempre que se utilicen estaciones de tres componentes. Y, sobre todo, permiten caracterizar mejor que las antenas si el contenido espectral de la señal está asociado a procesos de fuente o de camino.

Según lo visto, la configuración idónea para el estudio de la actividad en un entorno volcánico sería una combinación de una red sísmica dispuesta en torno a la zona activa más dos o más antenas sísmicas (ver figura 2 como un ejemplo idóneo). Sin embargo, teniendo en cuenta las dificultades que suele entrañar el despliegue y mantenimiento de una red en este tipo de entornos, normalmente la solución adecuada puede ser una o varias antenas trabajando en modo combinado.

TÉCNICAS DE LOCALIZACIÓN USANDO ANTENAS SÍSMICAS

En primer lugar debemos definir qué se entiende por localizar con una antena sísmica. Supongamos que tenemos una antena sísmica formada por N sismómetros situados sobre un plano horizontal en las posiciones \mathbf{r}_j , con los que se han tomado los registros de una componente de la velocidad, $u_j(t)=u(\mathbf{r}_j,t)$ (figura 4). Suponiendo que se trata de ondas planas, tratamos de determinar el azimut de donde proceden (back-azimut) y la velocidad aparente con la que atraviesan la antena, o lo que es lo mismo, el vector lentitud \mathbf{s} , que tiene la misma dirección y sentido que el vector número de onda \mathbf{k} y módulo dado por $s=k/2\pi f$.

Por tanto, se entiende por localización usando antenas sísmicas la determinación del back-azimut y de la lentitud aparente de las ondas incidentes.

Las técnicas de localización de las antenas sísmicas están basadas en la búsqueda de la

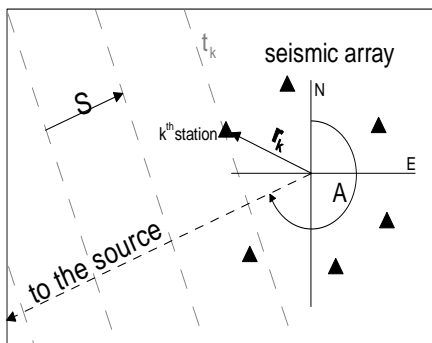


Figura 4. Planteamiento del problema de la localización con antenas sísmicas.

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.

Esta 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-), ver por ejemplo Frankel et al. (1991) o Del Pezzo et al. (1997). En el dominio de la frecuencia existen múltiples técnicas, destacando la denominada MUSIC (Goldstein y Archuleta, 1987), la "Beam Forming" (LaCoss et al., 1969), o la "High Resolution" (Capon, 1969).

Debido a la complejidad de formulación que harían que este texto fuese innecesariamente largo, en este capítulo nos vamos a dedicar exclusivamente a estudiar cómo se localiza usando la técnica ZLCC que trabaja en el dominio del tiempo.

Técnica de localización ZLCC

El proceso de cálculo en esta técnica parte de la selección de un intervalo de señal en donde se espere obtener coherencia y su filtrado en la banda de frecuencias de interés, con el fin de eliminar influencias de otras señales. La duración del intervalo se elegirá en función de la longitud de onda (son necesarios al menos dos o tres periodos), de la apertura de la antena (hay que estar seguros de que la señal está presente en todas las ventanas), y de la velocidad aparente esperada (a mayor velocidad menor ventana). Una vez seleccionada la señal y una estación de referencia, se procede a la estimación de la coherencia en función de sucesivos azimutes y velocidades aparentes, desplazando los intervalos de señal en función de llegadas teóricas. Aquella dirección y velocidad aparente que presente la mayor coherencia se puede considerar como la dirección de incidencia (ver figura 5). 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. Veamos a continuación con algo más de detalle qué significa obtener la máxima correlación cruzada.

Determinación de la correlación cruzada máxima

Si tenemos dos señales f y g , definimos su función de correlación 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 del array 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

$$\rho(\vec{s}) = \frac{1}{N^2} \sum_{j,k=1}^N \frac{R_{jk}(\tau_{jk}(\vec{s}))}{\sqrt{R_{jj}(0) R_{kk}(0)}}$$

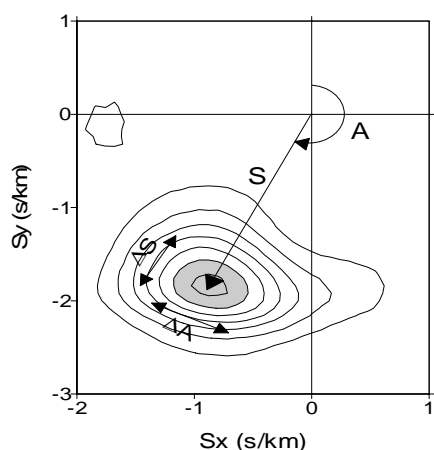


Figura 5. Solución del problema de localización, con los errores de lentitud aparente (ΔS) y azimut (ΔA) en el plano de lentitud aparente.

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 antena 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).

El vector lentitud que se obtiene como resultado es el correspondiente al máximo o máximos del coeficiente de correlación (MACC), y nos da

información tanto de las direcciones de las que provienen las ondas como de sus velocidades aparentes (figura 5). Este método es muy flexible ya que permite utilizar longitudes de ventana arbitrarias. Sin embargo, tiene poca resolución ya que no es capaz de separar bien llegadas de ondas diferentes al mismo tiempo. Para conseguir mayor resolución, se utiliza otro método que se conoce como MUSIC (Goldstein y Archuleta, 1987).

Aplicaciones

El concepto de localización usando las antenas sísmicas puede tener un significado más amplio que la sola determinación de las coordenadas espaciales de la fuente. Puesto que estas técnicas se aplican a diversas ventanas temporales de la señal, podemos obtener información de la posible evolución espacio-temporal de la fuente, como veremos más adelante.

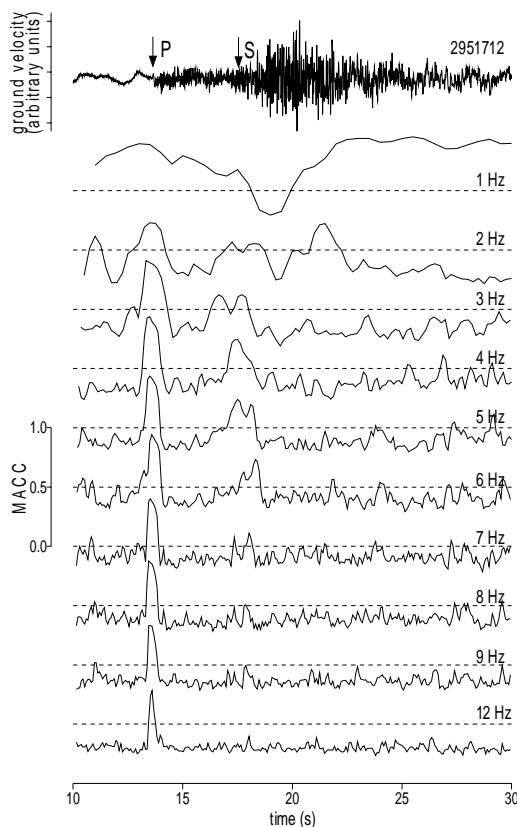


Figura 6. Evolución de la correlación máxima en función del tiempo y la frecuencia para un terremoto registrado en una antena en la Cañada de Diego Hernández (Tenerife). Obsérvese como la máxima correlación aparece con la llegada de la onda P y existe otra correlación significativa para la llegada de la onda S.

En la figura 3 se muestra un ejemplo de cómo el uso combinado de dos antenas puede dar información de cuál es la región fuente donde se originó la señal analizada. Además, es posible determinar cuál es el error esperado en ese cálculo.

Es posible aplicar esta técnica de localización sobre todo el sismograma. Cuando éste corresponde al registro de un terremoto, como es el caso de la figura 6, sea cual sea la banda de análisis, los valores altos de correlación sólo corresponderán a la llegada de la fase P, y puede que algo a la de la S. El resto de la señal, al estar compuesta por llegadas de fases no coherentes (Del Pezzo et al., 1997), presentará valores bajos de correlación. Este resultado nos indica que una fuente sísmica sólo actuó en el momento de generación o de ruptura, y el resto del sismograma lo componen llegadas que han sufrido múltiples procesos en su propagación. Sin embargo, si la señal corresponde a la de un tremor, como se presenta en la figura 7, se observa que aparecen llegadas coherentes a lo largo de todo el sismograma (flechas de mayor tamaño en la figura). Este hecho nos revela en qué momentos ha estado

actuando la fuente, cual es su dirección, y si ha sufrido un proceso ascendente o descendente (en función de cómo varía la velocidad aparente). Por tanto, no sólo se puede obtener información de la posición de la fuente, sino de su evolución espacio-temporal.

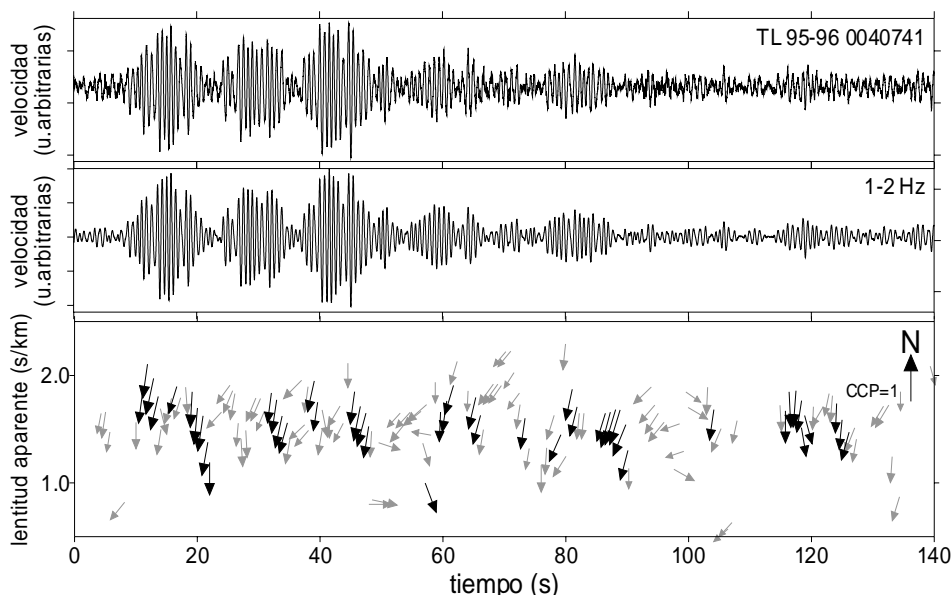


Figura 7. Resultados del método de la ZLCC a lo largo del tiempo para un episodio de tremor de baja frecuencia T_L .

DISEÑO PRÁCTICO DE ANTENAS

Las antenas sísmicas tienen diversas aplicaciones directa o indirectamente relacionadas con el estudio de la estructura terrestre, por lo que el primer factor que condiciona su diseño es el campo de aplicación en el que se va a utilizar. En esta discusión nos ceñiremos al diseño de antenas con aplicación a la Sismología y Volcanología.

1. El primer factor que hay que tener en cuenta en el diseño de una antena sísmica es el **tipo de señal** objeto de nuestro estudio. El rango espectral de la señal que se pretende registrar determina, en primer lugar, la mínima frecuencia de muestreo que se debe emplear. Según el teorema de Shannon, ésta debe ser al menos el doble de la máxima frecuencia que queremos registrar, para evitar la aparición del fenómeno de *aliasing*. En la práctica, se suele muestrear a una frecuencia, como mínimo, cuatro o cinco veces mayor que la máxima frecuencia de la señal. El rango de frecuencias de interés en Sismología Volcánica es aproximadamente 1-15Hz. Las señales de tremor y eventos de largo periodo (LPs) suelen estar en el rango 1-3Hz, mientras que los híbridos y terremotos volcano-tectónicos pueden llegar hasta los 15Hz o más. Según este razonamiento, bastaría con fijar la frecuencia de muestreo de una antena en unos 60Hz. Sin embargo, las técnicas de análisis de antenas sísmicas se basan en la búsqueda de correlación de señales que atraviesan la zona de la

antena con alta velocidad aparente, por lo que en la práctica se utilizan frecuencias de muestreo mayores, como mínimo de 100Hz.

Además de la frecuencia de muestreo, el rango espectral condiciona la configuración espacial de la antenna: apertura, separación media entre estaciones y disposición espacial de las mismas. Si la separación entre estaciones es demasiado grande, aparecerá el fenómeno de *aliasing espacial*, análogo al *aliasing* que se presenta en el dominio del tiempo si la frecuencia de muestreo es demasiado baja. En este caso, para evitar este efecto de pérdida de información, la separación entre estaciones debe ser siempre menor que la mitad de la longitud de onda de la señal a registrar. También existe un límite inferior del diámetro o apertura total de la antenna, que debe ser tan grande al menos como la longitud de onda más larga que nos interese (Asten y Henstridge, 1984). Así, si pretendemos registrar señales en el rango 1-3Hz en un medio donde la velocidad de las ondas es de 1km/s, tendremos

$$v = \lambda \cdot f \Rightarrow \lambda_{min} = 333m, \lambda_{max} = 1000m$$

Por tanto, la apertura total debe ser al menos de 1km, y la configuración debe ser tal que, mirando desde cualquier dirección, haya estaciones con una separación menor de 165m.

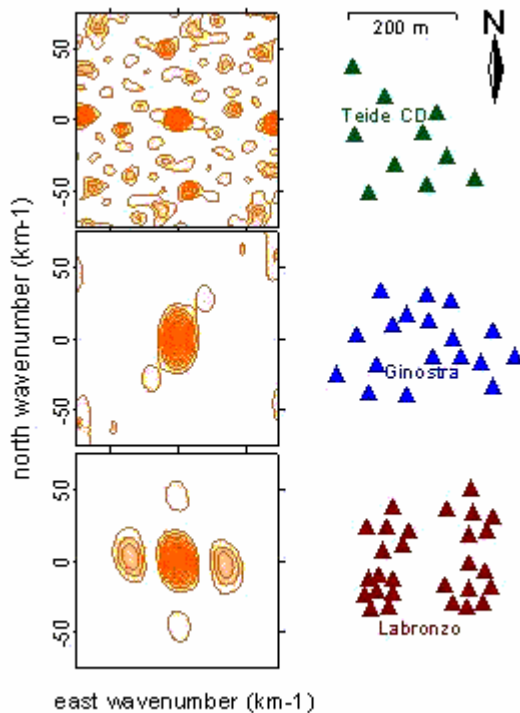


Figura 9. Distintas configuraciones de antenna, junto a sus capacidades de resolución espacial. De arriba abajo, configuración triangular (Teide), aleatoria (Ginostra, Stromboli), y grupo de cuatro sub-antenas circulares (Labronzo, Stromboli). Es destacable la disminución del efecto de aliasing espacial en el segundo caso.

La disposición espacial de los sensores condicionará la resolución de la antenna. La respuesta de la antenna viene determinada por la separación y orientación de los sismómetros. Así, como se observa en la figura 9, diversas configuraciones presentan distintas respuestas o capacidades de resolución espacial. Por otro lado, el objetivo del estudio también determinará la configuración de los sensores. Si se desea, por ejemplo, estudiar la estructura de velocidad justo debajo de las antenas, éstas deberán configurarse de manera geométrica e isoespaciada, preferiblemente en configuración semicircular e incluyendo sensores de tres componentes. Este tipo de distribución tiene el problema de un posible *aliasing* espacial. La mejor forma de resolverlo es la distribución casi aleatoria de las estaciones, con algunas direcciones preferentes hacia la posible región fuente (figura 9).

Por su parte, la resolución mínima del sistema de adquisición viene determinada por el rango dinámico de las señales que se pretende registrar. En nuestro caso, éste suele ser bastante grande, sobre todo si se pretende obtener un sistema de uso general, capaz de registrar desde el ruido de fondo de un volcán hasta las señales sísmicas de máxima amplitud sin saturarse. Afortunadamente, la tecnología actual permite utilizar conversores analógico/digital con una resolución de hasta veinticuatro bits, con bajo consumo y precio muy asequible.

2. El segundo factor que condiciona el diseño de una antena sísmica es su **portabilidad**. Las variables de diseño son distintas en el caso de que se desee un sistema portátil o uno fijo. En el primer caso hay una serie de factores condicionantes como son el consumo, peso, volumen o facilidad de despliegue. En caso de que el sistema que se diseña sea fijo, habrá que adaptarse a las condiciones existentes en el emplazamiento definitivo de la antena, y, probablemente, no serán tan condicionantes algunos de los factores anteriores. Teniendo en cuenta que en este caso las condiciones serían muy particulares y distintas en cada aplicación, nos ceñiremos en la discusión al caso más general de una antena portátil.

En el caso de una antena portátil, uno de los factores más determinantes en el diseño es el **consumo**. Teniendo en cuenta que los ambientes volcánicos normalmente carecen de una infraestructura básica, la alimentación del sistema se realizará a través de baterías. En caso de que las zonas de despliegue de la instrumentación sean de difícil acceso, se puede contemplar la posibilidad de alimentar las baterías a base de paneles solares para evitar, en la medida de lo posible, tareas de mantenimiento. No obstante, si en la fase de diseño se ha tenido en cuenta el factor consumo, es posible conseguir sistemas con una autonomía considerable incluso sin paneles solares ni otro tipo de recarga. Se pueden utilizar, por ejemplo, microcontroladores de bajo consumo en los puntos de adquisición, con un único PC portátil que concentre los datos de todos los puntos. Si el PC portátil se sustituye por una tarjeta de PC industrial el consumo se reduce aún más, hasta el orden de pocos vatios para todo el conjunto. Esto supone una autonomía de varios días con baterías de camión normales (por ejemplo 135 Ah), pudiendo llegar a semanas si se utilizan trenes de baterías de alta capacidad.

El diseño reducido en **peso y volumen** es otro factor a tener en cuenta en un *array* portátil, sobre todo si se desea contar con un instrumento de intervención rápida para crisis volcánicas. El peso y volumen de todo el conjunto deben ser tales que permitan el transporte como equipaje de mano en un avión.

La **facilidad de instalación** también es importante, ya que normalmente no se cuenta con mucho tiempo desde que se tiene constancia de una posible crisis hasta que ésta se produce. En este sentido hay varios factores que se deben tener en cuenta en la fase de diseño, a saber: modularidad, tipo de transmisión de datos y flexibilidad de instalación.

Un diseño por módulos independientes es recomendable, ya que facilita tanto las tareas de desarrollo como las de instalación y mantenimiento (sustitución de módulos averiados, por ejemplo). Un diseño típico podría ser el que se muestra en la figura 10; varios módulos de adquisición de datos, con un módulo central que concentra los datos de todos los puntos de adquisición, y que sincroniza todo el proceso con la ayuda de un módulo de reloj. Este conjunto debería tener capacidad para operar aisladamente o en conjunción con otros

subsistemas similares. En este sentido, también es aconsejable realizar un diseño flexible del dispositivo. Esto es, dotar al sistema de capacidad de operación con distintas configuraciones. Si, por ejemplo, se desea una antena con 32 canales de adquisición, se puede orientar el diseño hacia cuatro subsistemas de ocho canales cada uno. A su vez, cada subsistema se puede dotar de flexibilidad para operar con los ocho canales o menos, o incluso como una sola estación con una o tres componentes.

En cuanto al sistema de transmisión de datos, prácticamente siempre se utilizará la telemetría por cable, que permite velocidades de transmisión altas y es más inmune a las interferencias electromagnéticas que la telemetría radio. Sólo en casos de extrema necesidad se considerarán posibilidades alternativas como la transmisión telefónica o vía

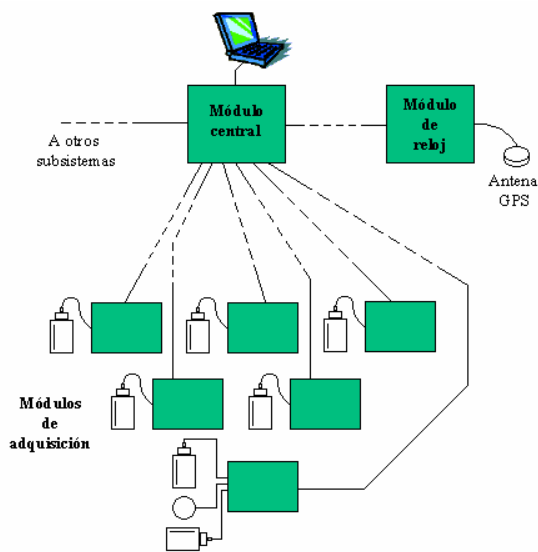


Figura 10. Esquema de diseño de una antena sísmica, donde se presentan los elementos principales: sensores, módulos de adquisición, módulo central controlado por un PC portátil y sistema de sincronismo de tiempo GPS.

radio. Pero incluso en zonas extremadamente abruptas o inaccesibles, el tendido de cables suele ser posible dado el reducido espacio en el que normalmente se disponen las antenas sísmicas. Un cable de tipo telefónico sin apantallamiento puede resolver nuestras necesidades, aunque uno apantallado es recomendable para distancias de transmisión altas.

3. Un factor de vital importancia en las antenas sísmicas es el **sistema de sincronización** de todo el dispositivo. Para que el resultado de la aplicación de técnicas de análisis de *array* sea bueno, hay que tener la certeza de que la adquisición de los datos se realiza de forma simultánea en todos los puntos.

En los sistemas modernos, normalmente la tarea de sincronización recae sobre receptores GPS, que representan una posibilidad de implementación sencilla y con un coste relativamente bajo (existen tarjetas receptoras por menos de 200 Euros, incluida la antena). En operación normal (una vez recibidos los satélites e inicializado el receptor) el equipo suministra al usuario una señal de un pulso por segundo, cuyo flanco inicial está sincronizado con el tiempo universal con una precisión de 1µs. Además, en cualquier momento el usuario puede pedir al receptor, usando un protocolo estándar, una serie de datos entre los que se encuentra la información completa de tiempo real. El usuario puede utilizar toda esta información para llevar a cabo la sincronización de la adquisición de datos en todos los puntos de muestreo. Se puede emplear, por ejemplo, el pulso de segundo para incrementar un reloj *software* interno en cada módulo de adquisición, y realizar con él la temporización del proceso. A su vez, se puede solicitar al receptor la información de tiempo real cada cierto tiempo (por ejemplo,

una vez al día, o cada vez que se detecte un evento) y utilizar dicha información para sincronizar los relojes *software* de los módulos de adquisición.

En principio, sólo en casos donde la utilización de un receptor GPS sea imposible (emplazamientos sin visibilidad GPS, antenas subterráneas,...) se debería contemplar la posibilidad de utilizar sistemas alternativos, como recepción de señales horarias vía radio o patrones de tiempo atómicos.

4. Un último factor que hay que tener en cuenta en el diseño de una antena sísmica es el tipo de **ambientes** en el que se pretende desplegar. Si se busca un instrumento capaz de operar en ambientes hostiles, con condiciones extremas de temperatura o humedad, hay que cerciorarse de que el rango de temperatura de funcionamiento de los componentes utilizados sea el adecuado. Si los componentes estándar no lo cumplen, es posible elegir componentes con rango de temperatura extendida, que implicarán un aumento, normalmente razonable, del precio.

Del mismo modo, para ambientes extremos es recomendable la utilización de cajas y conectores adecuados, que a la larga pueden ahorrar muchos quebraderos de cabeza y sinsabores al personal que se ocupe del mantenimiento de los equipos. En este caso, sin embargo, el aumento de precio sí que puede ser muy elevado, hasta el punto de que los conectores y cajas pueden llegar a costar varias veces más que la propia electrónica del sistema. Por eso, en este punto más que en ningún otro, es necesario llegar a un compromiso entre las prestaciones (en términos de estanqueidad, grado de aislamiento y fiabilidad de los contactos de los conectores) y precio. A título de ejemplo, el conjunto conector macho para chasis más conector hembra para cable, de 6 vías, de plástico y sin un aislamiento especial, puede costar del orden de 4 Euros. El mismo conjunto, en formato militar y con contactos chapados en oro cuesta del orden de 75 Euros.

CONCLUSIONES

El uso de las antenas sísmicas para el estudio sísmico de una región volcánica supone un especial avance, tanto desde el punto de vista de la información adicional que suministran, como en los procesos de despliegue y mantenimiento. Las antenas suponen una de las pocas herramientas que permiten el estudio de la fuente de las señales puramente volcánicas como son el tremor volcánico y los eventos L.P.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer al prof. Edoardo Del Pezzo, y a los doctores Gilberto Saccorotti y Javier Almendros por permitirnos usar algunas de las figuras que se presentan en este texto.

BIBLIOGRAFÍA

ALMENDROS, J.; IBÁÑEZ, J.M.; ALGUACIL, G.; DEL PEZZO, E.; ORTIZ, R. (1997). *Array tracking of the volcanic tremor source at Deception Island, Antarctica*. *Geophys. Res. Lett.*, **24**: 3069-3072.

- ALMENDROS, J.; IBÁÑEZ, J. M.; ALGUACIL, G.; MORALES, J.; DEL PEZZO, E.; LA ROCCA, M.; ORTIZ, R.; ARAÑA, V.; BLANCO, M. J. (2000). *A double seismic antenna experiment at Teide Volcano: Existence of local seismicity and lack of evidences of volcanic tremor*. J. Volcanol. Geotherm. Res., en prensa.
- ASTEN, M.W.; HENSTRIDGE, J.D. (1984). *Array estimators and the use of microseism for reconnaissance of sedimentary basins*. Geophysics, **49**: 1828-1837.
- CAPON, J. (1969). *High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis*. Proc. IEEE, **57**: 1408-1418.
- CHOUET, B. A. (1996). *Long-period volcano seismicity: its source and use in eruption forecasting*. Nature, **380**: 309-316.
- CHOUET, B.A.; SACCOROTTI, G.; MARTINI, M.; DAWSON, P.; DE LUCA, G.; MILANA, G.; SCARPA, R. (1997). *Source and path effects in the wave fields of tremor and explosions at Stromboli Volcano, Italy*. Journ. Geophys. Res., **102**: 15129-15150.
- DEL PEZZO, E.; LA ROCCA, M.; IBÁÑEZ, J.M. (1997). *Observations of high-frequency scattered waves using dense arrays at Teide volcano*. Bull. Seism. Soc. Am., **87**: 1637-1647.
- DEL PEZZO, E.; CASTELLANO, M.; CAPELLO, M.; GIUDICEPIETRO, F.; LA ROCCA, M.; MARTINI, M.; PETROSINO, S.; SACCOROTTI, G.; IBÁÑEZ, J. M.; ABRIL, M.; ALMENDROS, J.; CARMONA, E.; MARTÍNEZ, C.; VÍLCHEZ, J.; PRIVITERA, E.; ALPARONE, S.; DI GRAZIA, G.; GRESTA, S. (2000). *A Double Seismic Array Experiment on Mt. Etna*. Open file del Osservatorio Vesuviano, 1/2000. www.osve.unina.it.
- DEL PEZZO, E.; BIANCO, F.; CASTELLANO, M.; PETROSINO, S.; PINGUE, F.; CAPELLO, M.; ESPOSITO, T.; AUGUSTI, V.; SACCOROTTI, G.; LA ROCCA, M.; MARESCA, R.; GALLUZO, D.; CIRILLO, A.; GROZEA, B.; IBÁÑEZ, J. M.; CARMONA, E.; ALGUACIL, G. (1999). *A seismic array on Mt. Vesuvius*. Open file del Osservatorio Vesuviano, 3/1999. www.osve.unina.it.
- FERRAZZINI, V.; AKI, K.; CHOUET, B.A. (1991). *Characteristics of seismic waves composing hawaiian volcanic tremor and gas-piston events observed by a near-source array*. Journ. Geophys. Res., **96**: 6199-6209.
- FERRAZZINI, V.; AKI, K. (1992). *Preliminary results from a field experiment on volcanic events at Kilauea using an array of digital seismographs*. En Volcanic Seismology, editado por K.Aki, P. Gasparini, and R. Scarpa. Springer-Verlag, Berlin: 168-189.
- FRANKEL, A.; HOUGH, S.; FRIBERG, P.; BUSBY, R. (1991). *Observations of Loma Prieta aftershocks from a dense array in Sunnyvale, California*. Bull. Seism. Soc. Am., **81**: 1900-1922.
- GOLDSTEIN, P.; ARCHULETA, R.J. (1987). *Array analysis of seismic signals*. Geophys. Res. Lett., **14**: 13-16.
- GOLDSTEIN, P.; CHOUET, B.A. (1994). *Array measurements and modeling of sources of shallow volcanic tremor at Kilauea Volcano, Hawaii*. Journ. Geophys. Res., **99**: 2637-2652.
- IBÁÑEZ, J. M.; MORALES, J.; ALGUACIL, G.; ALMENDROS, J.; ORTIZ, R.; DEL PEZZO, E. (1997). *Intermediate-focus earthquakes under South Shetland Islands (Antarctica)*. Geophys. Res. Lett., **24**: 531-534.
- IBÁÑEZ, J. M.; DEL PEZZO, E.; ALMENDROS, J.; LA ROCCA, M.; ALGUACIL, G.; ORTIZ, R.; GARCÍA, A. (2000). *Seismovolcanic signals at Deception Island volcano, Antarctica: wave field analysis and source modeling*. Journ. Geophys. Res. En Prensa
- LACOSS, R.T.; KELLY, E.J.; TOKSOZ, M.N. (1969). *Estimation of seismic noise structure using arrays*. Geophysics, **34**: 21-38.

- METAXIAN, J.P.; LESAGE, P.; DOREL, J. (1997). *Permanent tremor of Masaya volcano, Nicaragua: wave field analysis and source location*. Journ. Geophys. Res., **102**: 22529-22545.
- SACCOROTTI, G.; CHOUET, B.; MARTINI, M.; SCARPA, R. (1998). *Bayesian statistics applied to the location of the source of Stromboli volcano, Italy*. Bull. Seism. Soc. Am., **88**: 1099-1111.