

RESOLUCIÓN D-149 DE 2017

(marzo 23)

Diario Oficial No. 50.192 de 31 de marzo de 2017

Servicio Geológico Colombiano

Por la cual se determinan las especificaciones del monitoreo de sismicidad cerca de los pozos de exploración y/o producción de hidrocarburos en yacimientos no convencionales.

El Director General del Servicio Geológico Colombiano, en ejercicio de sus atribuciones legales y, en especial, las que le confieren el numeral 1 del artículo 10 y los numerales 1, 3 y 10 del artículo 4º del Decreto-ley 4131 de 2011, así como las establecidas en los numerales 1, 2, 4 y 10 del artículo 9º del Decreto número 2703 de 2013, y

CONSIDERANDO:

Que de conformidad con el artículo 3º del Decreto-ley 4131 de 2011, el Servicio Geológico Colombiano tiene como objeto realizar la investigación científica básica y aplicada del potencial de recursos del subsuelo; adelantar el seguimiento y monitoreo de amenazas de origen geológico; administrar la información del subsuelo, entre otros;

Que de conformidad con los numerales 1, 3 y 10 del artículo 4º del Decreto-ley 4131 de 2011, el Servicio Geológico Colombiano tiene entre sus funciones asesorar al Gobierno nacional para la formulación de las políticas en materia de geociencias, amenazas y riesgos geológicos; generar e integrar conocimientos y levantar, compilar, validar, almacenar y suministrar, en forma automatizada y estandarizada, información sobre geología, recursos del subsuelo y amenazas geológicas, de conformidad con las políticas del Gobierno nacional; e investigar fenómenos geológicos generadores de amenazas y evaluar amenazas de origen geológico con afectación regional y nacional en el territorio nacional;

Que de conformidad con los numerales 1, 2, 4 y 10 del artículo 9º Decreto número 2703 de 2013, la Dirección de Geoamenazas del Servicio Geológico Colombiano tiene como funciones *"proponer a la Dirección General, políticas, planes, programas y proyectos que en materia de investigación en amenazas*

geológicas y riesgo físico, deba adoptar esta Dirección”, “dirigir las actividades conducentes al estudio, análisis y evaluación de las amenazas de origen geológico y de afectación regional y nacional en el territorio nacional”, “investigar, identificar, caracterizar, monitorear, evaluar, diagnosticar y modelar fenómenos geológicos generadores de amenazas”, y “proponer a la Dirección General, políticas, planes, programas y proyectos que en materia de investigación en amenazas geológicas y riesgo físico, deba adoptar esta Dirección”;

Que la Resolución número 90341 del 27 de marzo de 2014 del Ministerio de Minas y Energía establece los requerimientos técnicos y procedimientos para la exploración y explotación de hidrocarburos en yacimientos no convencionales, incluyendo aquellos relacionados con la información geológica y el monitoreo de sismicidad cerca de los pozos de exploración y/o producción de yacimientos no convencionales;

Que el artículo 13 de la citada Resolución número 90341 del 27 de marzo de 2014, asigna al operador la obligación de efectuar durante el desarrollo de operaciones para la exploración y explotación de hidrocarburos en yacimientos no convencionales el monitoreo, entre otros, de sismicidad, de acuerdo con las especificaciones que establezca el Servicio Geológico Colombiano, cuando no se cuente con una red lo suficientemente adecuada cerca a los pozos de exploración y/o producción;

Que el artículo 15 de la Resolución número 90341 del 27 de marzo de 2014 del Ministerio de Minas y Energía, asigna al operador la obligación de efectuar durante el desarrollo de operaciones para los pozos inyectores de fluido de retorno y agua de producción, el deber de efectuar el monitoreo, entre otros, de sismicidad, de acuerdo con las especificaciones que establezca el Servicio Geológico Colombiano para tal fin, cuando no se cuente con una red lo suficientemente adecuada cerca a los pozos de inyección;

Que en el país no se cuenta con una red suficientemente adecuada para detectar la sismicidad cerca de los pozos de exploración y/o producción de yacimientos no convencionales y de pozos inyectores de fluido de retorno y agua de producción, en tanto la cobertura de las redes existentes resulta insuficiente para satisfacer las necesidades de dicho monitoreo, por lo que resulta necesario que el Servicio Geológico Colombiano, en cumplimiento de sus funciones legales y reglamentarias, defina las especificaciones técnicas que garanticen el adecuado monitoreo de sismicidad teniendo en cuenta las normas técnicas aplicables y las mejores prácticas del sector;

Que en cumplimiento de lo establecido en el numeral 8 del artículo 8° de la Ley 1437 de 2011, el presente proyecto se publicó en la página web del Servicio

Geológico Colombiano del 21 de diciembre de 2015 al 20 de enero de 2016 y los comentarios recibidos fueron debidamente analizados;

Que el Servicio Geológico Colombiano por medio de oficio con Radicado número 1-2017-002614 de fecha 17 de febrero de 2017, sometió el proyecto de resolución al concepto de que trata el artículo 2º del Decreto 1844 de 2013, y obtuvo respuesta por parte de la Dirección de Regulación del Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, oficio con Radicado número 2017-261001129-2 de fecha 13 de marzo de 2017, en el cual concluyó: *"Al respecto, en el proyecto del acto administrativo arriba mencionado (...) esta Dirección considera que a la luz del Acuerdo sobre Obstáculos Técnicos al Comercio de la Organización Mundial del Comercio, este proyecto no se constituye en un Reglamento Técnico, por ende, no está sujeto a lo señalado en el artículo 2.2.1.7.5.6 del Decreto número 1595 del 5 de agosto de 2015, ni se debe notificar en el marco de los acuerdos OTC y MSF de la Organización Mundial del Comercio"*;

Que en cumplimiento de lo establecido en el artículo 2.1.2.1.11 del Decreto número 1609 de 2015, la presente resolución se sometió previamente a consideración del Departamento Administrativo de la Función Pública;

Que en mérito de lo expuesto,

RESUELVE:

Artículo 1º. *Objeto de la resolución.* El objeto de la presente resolución es determinar las especificaciones del monitoreo de sismicidad cerca de los pozos de exploración y/o producción de hidrocarburos en yacimientos no convencionales.

Los operadores deberán cumplir con las especificaciones técnicas previstas en el Anexo de esta resolución para el monitoreo de sismicidad cerca de los pozos de exploración y/o producción de yacimientos no convencionales al que se refieren los artículos 13 y 15 de la Resolución número 90341 del 27 de marzo de 2014 del Ministerio de Minas y Energía, o las normas que los modifiquen.

Los conceptos técnicos citados en la presente Resolución se definen en el Anexo.

Artículo 2º. *Informe.* De manera previa o concomitante al inicio de la transmisión de datos contemplada en el artículo 3º de la presente resolución y antes de empezar las operaciones de estimulación hidráulica y las actividades de inyección

de fluido de retorno y agua de producción a las que se refiere la Resolución número 90341 del 27 de marzo de 2014 del Ministerio de Minas y Energía, el operador deberá presentar a la Dirección de Geoamenazas del Servicio Geológico Colombiano un informe suscrito por el Representante Legal que contenga como mínimo los siguientes elementos e información técnica:

1. Coordenadas geográficas en sistema de referencia WGS84 de la localización (latitud, longitud y altitud) de las estaciones (medidas con precisión de 4m o mejor), junto con el listado de los equipos instalados en cada punto y sus hojas de calibración de fábrica.
2. Coordenadas geográficas en sistema de referencia WGS84 de los pozos o arreglo de pozos junto con su profundidad vertical y estimada o medida (en caso de que el pozo ya esté perforado).
3. Mapa que contenga las coordenadas indicadas en los numerales (1) y (2), junto con la información a la que se refieren el numeral 6 del artículo 12 y el numeral 1 del artículo 15 de la Resolución número 90341 del 27 de marzo de 2014 del Ministerio de Minas y Energía.
4. Gráficas de densidad espectral de potencia probabilística para cada estación, como lo indica el numeral 4 del Anexo de esta resolución.
5. Interpretación de las principales fuentes de ruido y su evolución temporal, para cada estación, como lo indica el numeral 4 del Anexo de esta resolución.
6. Análisis de la determinación de la ubicación de las estaciones, con nivel de ruido óptimo en altas frecuencias, según numeral 4 del Anexo de esta resolución.
7. Datos de contacto del operador, dirección física a la cual se pueda hacer el envío de comunicaciones, así como una dirección de correo electrónico, con la indicación de que acepta la recepción de comunicaciones en la dirección física o electrónica.
8. Archivo con las capas de información geográfica en formato de 'shapefile' (.shp) que contenga las coordenadas indicadas en los numerales (1) y (2), junto con la información a la que se refiere el numeral 6 del artículo 12 y el numeral 1 del artículo 15 de la Resolución número 90341 del 27 de marzo de 2014.

9. Series de tiempo en formato miniSEED de la señal sísmica continua propia de cada sitio, registrada durante mínimo siete (7) días, almacenadas en archivos de un (1) día de duración, según se indica en el Anexo y en cualquier caso la totalidad del tiempo en el que se haya efectuado el registro de la señal sísmica.

10. Archivos de respuesta por estación de los instrumentos que se instalaron, en formato dataless SEED, junto con las hojas de calibración de fábrica de cada uno de los equipos.

11. Formatos de "Búsqueda de Sitio" definidos por el Servicio Geológico Colombiano, diligenciados por estación.

12. Formatos de "Instalación y mantenimiento" definidos por el Servicio Geológico Colombiano, diligenciados por estación.

Todos los equipos instalados en las estaciones, así como la distribución espacial de las mismas, deben estar acorde a las especificaciones del Anexo de esta resolución.

Artículo 3º. *Transmisión de datos.* Las señales de las estaciones se deben transmitir satelitalmente en tiempo real y sin interrupciones con una latencia menor a 30 segundos, para ser recibidas en la estación maestra de la Red Sismológica Nacional del Servicio Geológico Colombiano, sede Bogotá. La transmisión se puede realizar mediante uno o más nodos satelitales (ver Anexo de esta resolución), siguiendo las especificaciones de configuración para la transmisión de datos suministradas por el Servicio Geológico Colombiano.

El operador deberá definir el sistema de comunicaciones, remitir dicha información y solicitar la información especificada en el numeral 2.2 del Anexo de esta resolución a la Dirección de Geoamenazas del Servicio Geológico Colombiano. El operador deberá comunicar por escrito a la Dirección de Geoamenazas del Servicio Geológico Colombiano la posible fecha y hora de la transmisión de datos, junto con la información de contacto de la persona responsable, para que sea concertada con la Dirección de Geoamenazas del Servicio Geológico Colombiano.

Al día hábil siguiente a la recepción efectiva de las señales en la estación maestra de la Red Sismológica Nacional del Servicio Geológico Colombiano, sede Bogotá, D. C., y durante el término de veintidós (22) días hábiles el operador debe mantener la transmisión en tiempo real y cumplir con la totalidad de las

especiaciones técnicas contenidas en la presente Resolución. La entidad contará con el término indicado previamente para informar al Ministerio de Minas y Energía o a quien haga sus veces en materia de fiscalización de las actividades de exploración y/o explotación de hidrocarburos sobre el cumplimiento o no de la totalidad de las especificaciones técnicas contenidas en la presente resolución.

El no cumplimiento de cualquier especificación técnica por parte del operador implica que él deba presentar nuevamente tanto el informe, como iniciar la transmisión de datos en tiempo real y aportar las demás evidencias de cumplimiento de las especificaciones técnicas solicitadas en la presente resolución.

Artículo 4º. *Calidad de señales en cualquier tiempo.* En caso de que el espectro de ruido sísmico de las señales de las estaciones recibidas en el Servicio Geológico Colombiano no cumpla con el criterio de calidad establecido en el numeral 4 del Anexo de esta resolución, el operador deberá:

1. Hacer el diagnóstico y las correcciones pertinentes para garantizar el cumplimiento de la obligación prevista en este artículo.
2. Comunicar a la Dirección de Geoamenazas del Servicio Geológico Colombiano sobre las acciones correctivas implementadas.
3. Enviar evidencia del éxito de la implementación de las acciones correctivas.

Artículo 5º. *Condiciones y procedimiento del monitoreo de sismicidad en cualquier tiempo.* El operador deberá garantizar mínimo el 90% de funcionamiento permanente y continuo de las estaciones y de transmisión de la información en tiempo real.

En caso de falla el operador deberá tomar las medidas correctivas necesarias para restablecer su funcionamiento, de acuerdo con las siguientes reglas:

1. Si existe un fallo en menos del 20% de las estaciones, el operador deberá restablecer su funcionamiento en un período no superior a 48 horas.

2. Si existe un fallo del 20% o más de las estaciones, el operador deberá restablecer su funcionamiento en un periodo no superior a 24 horas.

En todo caso, el operador deberá garantizar el almacenamiento de la información generada mientras se toman las medidas correctivas, y deberá remitirla a la Dirección de Geoamenazas del Servicio Geológico Colombiano en formato miniSEED al restablecer el funcionamiento.

En el evento en que se realice algún cambio en la instrumentación sismológica instalada, el operador deberá informar inmediatamente a la Dirección de Geoamenazas del Servicio Geológico Colombiano, adjuntando lo siguiente:

1. Los archivos de respuesta de las estaciones modificadas en formato dataless SEED.

2. Las hojas de calibración de fábrica de cada uno de los equipos.

3. Formatos de "Instalación y mantenimiento" correspondiente.

En el evento de cambio de equipos por cualquier circunstancia, el operador deberá cumplir con las especificaciones técnicas del Anexo de la presente resolución.

Artículo 6º. *Informes de funcionamiento mes vencido.* Una vez se encuentre funcionando la red de monitoreo, el operador deberá presentar a la Dirección de Geoamenazas del Servicio Geológico Colombiano informes del monitoreo mensual vencido, los primeros cinco (5) días hábiles del mes siguiente, los cuales deberán contener:

1. Estadísticas de funcionamiento de las estaciones.

2. Imprevistos.

Artículo 7º. *Período de funcionamiento de la red de monitoreo al terminar las operaciones.* El período de funcionamiento de la red de monitoreo, luego de terminadas las operaciones, deberá ser el doble del tiempo de duración de las

operaciones. En ningún caso puede ser inferior a dos (2) meses ni superior a un (1) año.

Artículo 8º. *Informe a la autoridad fiscalizadora.* El Servicio Geológico Colombiano informará al Ministerio de Minas y Energía o a quien haga sus veces en materia de fiscalización de las actividades de exploración y/o explotación de hidrocarburos, aquellas circunstancias que puedan constituir incumplimiento de la presente resolución.

Artículo 9º. *Vigencia.* La presente resolución rige a partir de la fecha de su publicación.

Publíquese y cúmplase.

Dada en Bogotá, D. C., a 23 de marzo de 2017.

El Director del Servicio Geológico Colombiano,

Óscar Eladio Paredes Zapata.

ANEXO

Especificaciones técnicas para el monitoreo de sismicidad cerca de los pozos de exploración y/o producción de hidrocarburos en yacimientos no convencionales (E&P en HYNC)

1. Alcance y definiciones

Este documento describe las especificaciones técnicas y los pasos que deberán seguir los operadores para la instalación de estaciones sismológicas que conformen una red para el monitoreo de actividad sísmica que se presente cerca de los pozos de E&P de HYNC.

El Servicio Geológico Colombiano podrá exigir instrumentación adicional o distribuciones particulares de las estaciones sismológicas cuando, teniendo en cuenta las condiciones del área de operaciones, sea necesario para que la red garantice el monitoreo de la actividad sísmica, de acuerdo con lo establecido en la presente resolución.

Definiciones:

Banda: Se denomina banda a un rango de frecuencias.

Codificación: Técnica utilizada para brindar seguridad y detectar errores en la información.

Data Rate: Velocidad de transmisión de datos, usualmente en bits por segundo.

Dataless SEED_[1]: Formato que contiene metadatos detallados de las estaciones sismológicas como su localización física y la información de la respuesta instrumental de los equipos.

EMI: Interferencia electromagnética (del inglés Electromagnetic Interference).

ESD: Descarga electrostática (del inglés Electrostatic Discharge).

Espectro: Se denomina espectro a la distribución de energía en una amplia variedad de frecuencias que comprende desde los rayos gamma de alta frecuencia hasta ondas de radio de baja frecuencia.

Gap: Separación angular entre dos estaciones contiguas con respecto al centro de la red.

Geoestacionario: Se llama geoestacionario al satélite cuya traslación está sincronizada con la rotación del cuerpo al cual orbita.

HUB: Se conoce como HUB al dispositivo encargado de enviar la misma información a todos los dispositivos terminales conectados a este.

Latencia: Diferencia de tiempo entre el tiempo actual y el tiempo del registro adquirido.

miniSEED_[1]: Formato que contiene los datos de las series de tiempo de amplitudes del movimiento del suelo medidas por los sismómetros.

Modulación: Conjunto de técnicas usadas para transmitir información a través de una señal portadora.

Nodo Satelital: Punto donde se reciben múltiples señales mediante cualquier método de comunicación para luego transmitir las a través de un único canal satelital.

Polarización: Propiedad de las ondas electromagnéticas, la cual describe la variación tiempo - dirección - amplitud.

Portadora: Señal de alta frecuencia que facilita la transmisión de información a través de un medio de propagación.

Posición Orbital: Posición en la cual se encuentra ubicado el satélite sobre la superficie del cuerpo al que orbita.

QPSK: Modulación por desplazamiento de fase cuadrifásica (del inglés Quadrature Phase-Shift Keying).

Red local de monitoreo: Red de estaciones sismológicas que se encarga del monitoreo de un (1) pozo o un conjunto de pozos, cuya operación este a cargo de uno (1) o más Operadores.

RFI: Interferencia de radiofrecuencia (del inglés Radio Frequency Interference).

Satélite Artificial: Equipo enviado por el humano que orbita un planeta, satélite natural o asteroides.

SEED_[1]: Formato binario de almacenamiento de datos sismológicos cuya sigla proviene de su nombre en inglés (Standard for the Exchange of Earthquake Data). El formato SEED se divide en dos partes lógicas: miniSEED y dataless SEED.

TCXO: Oscilador de cristal compensado por temperatura (del inglés Temperature Compensated Crystal Oscillator).

Transpondedor: Es la combinación de transmisor y receptor, el cual recibe y transmite señales con diferente portadora.

2. **Instrumentación mínima requerida**

2.1. **Instrumentación sismológica**

Las especificaciones técnicas mínimas que debe cumplir la instrumentación sismológica se describen en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas de digitalizadores, sismómetros y acelerómetros requeridos para las estaciones de monitoreo

DIGITALIZADOR	
Número de canales	3 canales (6 canales para estación donde se instale acelerómetro)
Rango dinámico	Mayor a 140 dB
Resolución	Mínimo 24-bit
Formato tx	32-bit entero, Nivel 2 comprimido en paquetes de 1

	segundo
Rango de entrada	40V P-P a ganancia=1
Filtros	Lineal o Fase Mínima FIR
Muestreo	200 mps, seleccionable por el usuario.
Base de tiempo	Precisión TCXO, enganchado al GPS. Sin ajuste.
Comunicaciones	Completa Dúplex, reconocimiento eficiente positivo con control de error. 10/100 base T Ethernet
Temperatura de operación	desde -15°C hasta 60°C
Control de sensor	Señales de calibración tipo escalón, seno y aleatorio. Centrado, bloqueo y desbloqueo de masas con comandos de forma remota.
Estados de salud	Temperatura, voltaje DC, estado del GPS, posición de masas
Modo de almacenamiento	Compatible con Compact flash, SD y/o USB
Memoria	Memoria de por lo menos 16Gb no volátil, con soporte superior a 100.000 escrituras.
Network	IEEE 802 10Base-T Ethernet UDP/IP Protocol
Puertos seriales	Al menos 1 puerto serial de telemetría y consola configurable hasta 115 kbaud O configuración con protocolo telnet.
Protocolo	Transmisión de datos en protocolo SEEDLINK con soporte de por lo menos 2 conexiones simultáneas.
SISMÓMETRO DE ESTACIÓN CENTRAL (Sensor de Velocidad - corto	

periodo)	
Topología	Triaxial simétrica
Sensibilidad	Superior o igual a 250 V/m/s con damping de 0.707
Ancho de banda	1Hz a 100 Hz (1 s - 100 Hz)
Tolerancia de inclinación	Mínimo $\pm 2.5^\circ$ en modo operativo
Señal de salida	Máximo 40V pico a pico diferencial
Temperatura de operación	-15°C a 60°C
SISMÓMETRO DE ESTACIÓN CIRCUNDANTE (Sensor de Velocidad - periodo intermedio)	
Topología	Triaxial simétrica
Sensibilidad	Superior o igual 750 V/m/s
Ancho de banda	Tres opciones: de 0.025 Hz a 100 Hz (40 s); de 0.0333 a 100 Hz (30 s); de 0.05 Hz a 100 Hz (20 s)
Nivel de ruido propio	Menor al New Low Noise Model (NLNM) en la banda de interés
Resonancias parasitas	Ninguna por debajo de 100 Hz
Señal de salida	Máximo 40V pico a pico diferencial
Temperatura de operación	-15°C a 60°C

ACELERÓMETRO (Sensor de Aceleración)	
Tipo	Acelerómetro triaxial de fuerza balanceada FBA (NO sensores tipo MEMS), orientado ortogonalmente
Ancho de banda	0.005 a 200 Hz (0.01 a 100 s)
Rango dinámico	Mayor a 160 dB
Escala total	$\pm 2g$
Señal de salida	Máximo 40V pico a pico diferencial
Protección	Protección para ESD, RFI y EMI para todas las entradas
Energía	Suministrada directamente por el digitalizador
Temperatura de operación	-15°C a 60°C
No linealidad	< 0.015%
Histéresis	< 0.1% de la escala completa
Otros	Cable de salida debe tener conexión al digitalizador.

2.2. Sistema de comunicaciones

La transmisión satelital debe hacerse con los siguientes parámetros:

INFORMACIÓN DEL SATÉLITE ARTIFICIAL

Nombre del satélite	Intelsat 907
Tipo de satélite	Geoestacionario
Posición orbital	332.5° E
Transpondedor	91C

PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN HUB SGC – BOGOTÁ

Banda de transmisión	Banda C
Polarización	Circular derecha
Data Rate	80 kbps
Modulación	QPSK
Codificación	Turbo code 0.95
Inversión de espectro	Invertido
Tipo de antena	Cassegrain
Diámetro la antena	9 metros

OBSERVACIONES:

El equipo debe ser totalmente compatible con la red satelital actual del SGC, la cual incorpora enrutamiento en aire con tecnología HDCL.

PARÁMETROS DE RECEPCIÓN HUB SGC – BOGOTÁ

Banda de recepción	Banda C
--------------------	---------

Polarización	Circular izquierda
Rango de frecuencia en recepción	5625 - 6425 / 3400 - 4200 MHz
Tipo de antena	Cassegrain
Diámetro la antena	9 metros
OBSERVACIONES:	
El equipo debe ser totalmente compatible con la red satelital actual del SGC, la cual incorpora enrutamiento en aire con tecnología HDCL.	

Una vez definido el sistema de comunicaciones especificando el número de canales satelitales, el operador deberá solicitar al Servicio Geológico Colombiano la siguiente información:

- Dirección IP y HDCL para cada canal satelital.
- Enrrutamiento en el HUB Bogotá para cada canal satelital.

Formato de transferencia de información: Todas las señales deben ser enviadas a la Red Sismológica del Servicio Geológico Colombiano en formato miniSEED a una tasa de muestreo de 200 muestras por segundo (mps) para señales de sismómetro y de acelerómetro. Los datos no deben estar corregidos por respuesta instrumental ni filtrados de ninguna forma. Los operadores deben entregar al Servicio Geológico Colombiano los archivos de respuesta instrumental de cada estación en formato dataless SEED junto con las hojas de calibración de los equipos suministradas por el fabricante.

2.3. Sistema de energía

El operador deberá contar con un sistema ininterrumpido de energía que garantice la transmisión de datos y el funcionamiento continuo y sin interrupciones de cada estación sin pérdida de información.

3. Diseño de redes de monitoreo - configuración espacial de estaciones

3.1. Diseño óptimo (teórico) de una red para la localización de eventos sísmicos

La red de monitoreo debe estar conformada por al menos seis (6) estaciones, mínimo tres (3) estaciones distribuidas sobre una circunferencia de radio $R1$ desde el centro de la red (estaciones centrales), rodeadas por tres (3) estaciones sobre una circunferencia exterior de radio $R2$ desde el centro de la red (estaciones circundantes). Al menos una de las estaciones centrales debe tener un sismómetro de periodo intermedio, el resto pueden tener sismómetros de periodo corto. Al menos una de las estaciones centrales debe tener un acelerómetro. Todas las estaciones circundantes deben tener sismómetros de periodo intermedio.

Condiciones mínimas de la red: el *gap* entre estaciones no debe superar los 150 grados angulares para las estaciones centrales y para las estaciones circundantes, entendiéndose por *gap* la separación angular entre dos estaciones contiguas con respecto al centro de la red. Los radios $R1$ y $R2$ deben estar entre 3 - 5 km y entre 12 - 30 km respectivamente. Las estaciones circundantes deben cubrir preferiblemente el *gap* de las estaciones centrales.

La red de monitoreo se considerará lo suficientemente adecuada para cualquier pozo P , ubicado a una distancia desde el centro de la red R_p menor que el radio de las *estaciones circundantes* $R2$ menos 2 veces la profundidad medida de dicho pozo P_m (es decir, $R_p = R2 - 2P_m$). De lo anterior se deriva que una red puede ser suficiente para monitorear más de un pozo.

En caso de necesitar más de una red para monitorear un conjunto de pozos, es posible optimizar el número de estaciones final haciendo que una misma estación haga parte de varias redes a la vez. En este caso, de ser necesario, se admitirá un cambio de sismómetro de estación central a sismómetro de estación circundante.

3.2. Consideraciones para el diseño real de una red de estaciones sismológicas

Los errores en la localización de eventos sísmicos deben ser menores a 2 km para las componentes horizontales y menores a 3 km en la componente vertical.

En caso de que no se cumpla con la expectativa en la precisión de las localizaciones de los eventos sísmicos (valores mencionados en el párrafo anterior), el operador deberá tomar medidas correctivas (redistribución de estaciones alrededor de focos de eventos sísmicos, adición de nuevas estaciones, etcétera).

4. Calidad de la señal

La calidad de la señal para cada estación se establece a partir del nivel de ruido sísmico registrado. Los sitios que se seleccionen para la instalación de estaciones sismológicas deben cumplir con los niveles óptimos de ruido establecidos por Peterson (Havskov & Alguacil, 2004)^[2], es decir, el espectro de densidad de potencia de la señal sísmica registrada no debe superar el nuevo modelo de ruido sísmico superior (NHNM por sus siglas en inglés), ni debe estar por debajo del nuevo modelo de ruido sísmico inferior (NLNM) en ninguna de las bandas de frecuencia registradas por el sensor. El operador deberá registrar la señal sísmica continua propia de cada sitio, con una instrumentación de las mismas características que se vaya a instalar en la estación según se definió en la sección 2.1, durante el mayor tiempo posible y remitir al SGC la señal de mínimo 7 días. El operador deberá calcular la densidad espectral de potencia (PSD, por sus siglas en inglés) y la densidad espectral de potencia probabilística (PPSD) para toda la señal (McNamara & Buland, 2004)^[3]. De estas curvas se debe interpretar cuáles son las principales fuentes de ruido y la evolución temporal de las mismas (tener en cuenta fuentes de ruido como maquinaria, vegetación densa, cuerpos de agua, animales y centros poblados).

5. Instalación

Al instalar los sensores, estos deben estar debidamente nivelados y orientados respecto al norte geográfico teniendo en cuenta la declinación magnética. En el caso del acelerómetro, éste debe ir anclado a la superficie y su escala debe estar fijada en 2g. El operador deberá verificar que la información se remita en tiempo real a la Dirección de Geoamenazas del Servicio Geológico Colombiano.

5.1. Configuración del digitalizador

El digitalizador deberá estar configurado con los siguientes parámetros:

Tasa de muestreo y nombre de los canales:

- Sismómetro Corto periodo: 200 mps - EHZ, EHN, EHE
- Sismómetro periodo intermedio: 200 mps - HHZ, HHN, HHE
- Acelerómetro: 200 mps - HNZ, HNN, HNE

Código de la estación: Debe ser un código de cinco caracteres (alfanuméricos). Los dos primeros caracteres deben ser las dos primeras letras del nombre del operador; el tercer caracter debe estar relacionado con el nombre del bloque, y los últimos dos deben ser números consecutivos de dos dígitos iniciando en 01. Se debe garantizar que nunca existan dos estaciones con el mismo código.

Código de localización:

- Sismómetro corto periodo: 20
- Sismómetro periodo intermedio: 30
- Acelerómetro: 10

Código de la red: CM

Formato: Mini-SEED.

* * *

2 Jens Havskov y Gerardo Alguacil. Instrumentation in Earthquake Seismology, volumen 22 de Modern Approaches in Geophysics. Springer, 2004.

3 McNamara, D. E., & Buland, R. P. (2004). Ambient Noise Levels in the Continental United States. Bulletin of the Seismological Society of America, 94 (Agosto 2004), 1517–1527.