

# ANALISIS DE CONFIABILIDAD DEL SISTEMA DE ALERTA SISMICA

A. Jiménez, J. M. Espinosa, F. Alcántar  
Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, México  
Anaxágoras 814, col. Narvarte, México, D.F.  
J. García  
Instituto Tecnológico de la Laguna  
Torreón, Coah., México.

## RESUMEN

El Sistema de Alerta Sísmica (SAS) para la ciudad de México ha estado funcionando desde hace dos años. Con el fin de poder determinar su confiabilidad y analizar su desempeño, en este trabajo se presentan los datos estadísticos de fallas en el equipo y programación del sistema así como la información sobre componentes y subsistemas que más afectan la confiabilidad del SAS. Se indican las principales fallas, tiempo de mantenimiento recomendable, estimaciones de disponibilidad y tiempo medio entre fallas. Se presentan las políticas para mantener en operación al SAS en forma confiable y se analiza su desempeño en la detección y generación de señal de aviso de alerta en la ocurrencia de temblores detectados en la Brecha de Guerrero.

## ABSTRACT

*The Early Warning System for Mexico, city has been working for almost two years, in order to be able to determine the reliability and performance of the System this paper presents the statistics of failures in the hardware and software and the information about what components or subsystems affect the overall reliability, the sources of failures, schedule in maintenance, availability and mean time between failures. The practices and procedures for attaining a high degree of reliability are presented. The performance in the detection and warning of earthquakes in the Guerrero Gap is discussed.*

## 1. ANTECEDENTES

El Sistema de Alerta Sísmica (SAS) es un proyecto de telemetría sísmica que permite detectar eventos sísmicos en la costa de Guerrero durante su ocurrencia y enviar información acerca de su magnitud por medio de radio-comunicación hasta el D.F. En el Centro de Control del SAS automáticamente se genera y difunde una señal de radio alerta, antes de que el sismo llegue a la Ciudad de México, para que la población pueda tomar medidas preventivas y de mitigación. Las estaciones de campo (ESDECA) que detectan el sismo son doce y se encuentran localizadas desde Papanoa hasta Punta Maldonado, sus transmisiones se concentran en el cerro El Veladero en Acapulco y desde ahí se envían a la Ciudad de México a través de repetidores localizados en los cerros El Ajquitrán y Chichinautzin.

Este sistema fue diseñado para operar con energía solar y permite informar de la ocurrencia de sismos fuertes en la costa de Guerrero, aproximadamente 50 segundos antes de que sus efectos arriben a la Ciudad de México.

Este proyecto fue desarrollado por el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRES) de la Fundación Javier Barros Sierra y patrocinado por el Departamento del Distrito Federal (DDF) y entró en operación el 18 de agosto de 1991. A partir de esa fecha el SAS ha sido objeto de un programa continuo de evaluación y perfeccionamiento. Durante los sismos del 14 de mayo de 1993 el SAS generó señales de alerta con 50 segs. de anticipación a la llegada de los efectos sísmicos al D.F. Las autoridades del DDF anunciaron la existencia del SAS al público dada la importancia social de este proyecto; por su característica de poder prevenir a la población de la inminente ocurrencia de un sismo en la ciudad de México.

En el diseño, construcción, instalación y operación de un sistema tecnológico complejo y con un impacto social estratégico, el factor de confiabilidad es importante y como el SAS pretende alertar sobre la ocurrencia de un fenómeno natural impredecible, como son los sismos, a los habitantes del DF, se procuró lograr un alto grado de confianza en que para un período dado el sistema cumpla la función para la cual fue diseñado.

La confiabilidad del sistema puede obtenerse en forma práctica o teórica, en el primer caso se requiere información sobre la operación del sistema durante un periodo dado y se utilizan métodos estadísticos. En el segundo caso, se obtiene un modelo matemático de confiabilidad basado en conceptos de probabilidad y modelado de sistemas. El presente trabajo se enfoca al primer caso.

Analizando la información de las fallas que ha experimentado el SAS desde su instalación, es posible obtener conclusiones acerca de su confiabilidad.

El presente trabajo analiza la confiabilidad del SAS desde las ESDECA en la costa de Guerrero, hasta que se transmite la señal de alerta a los usuarios en la Estación Central de Registro, en el DF. Por ahora no se toma en cuenta la confiabilidad asociada a los receptores del usuario.

## 2. INTRODUCCION

El SAS, está formado por tres subsistemas conectados en serie: El Subsistema Sismodetector (SISIDE), el Subsistema de comunicaciones Guerrero-Distrito Federal (SICOGUEDF) y la Estación Central de Registro (ESCERE) situada en el Distrito Federal.

El SISIDE formado por 12 ESDECA detecta la actividad sísmica por medio de sensores acelerométricos. Localmente los datos son procesados digitalmente en tiempo real por un algoritmo que detecta la presencia de sismo y estima su magnitud en no más de 20 seg. esta información se envía por radio hasta la Estación Concentradora Repetidora (ESCORE) situada en el cerro El Veladero en Acapulco. El SICOGUEDF lo constituyen estaciones receptoras-transmisoras situadas en los cerros: El Veladero, El Alquitrán y Chichinautzin así como en el Distrito Federal.

Al arribar la información sísmica a la ESCERE, se procesa automáticamente para determinar la magnitud del evento sísmico y decidir si se genera la alerta sísmica que se difundirá en todo el Valle de México, aproximadamente 50 segundos antes de que llegue el sismo (Espinosa *et al*, 1992).

El SAS fue diseñado para ser 100% redundante, esto implica que el sistema SICOGUEDF y ESCERE están completamente duplicados y funcionan simultáneamente en paralelo, como se puede ver en la figura 1. Los dos sistemas tienen las mismas especificaciones de diseño y son completamente independientes entre sí.

El SISIDE tiene una redundancia mayor ya que por la separación de las ESDECA (25 km) al ocurrir sismos importantes se han generado hasta 6 detecciones simultáneas.

Cabe anotar que por causa de interferencias en algunas frecuencias de radio asignadas, el SICOGUEDF ha operado temporalmente sin redundancia, pero que a partir del 1 de agosto se encuentran funcionando de manera redundante.

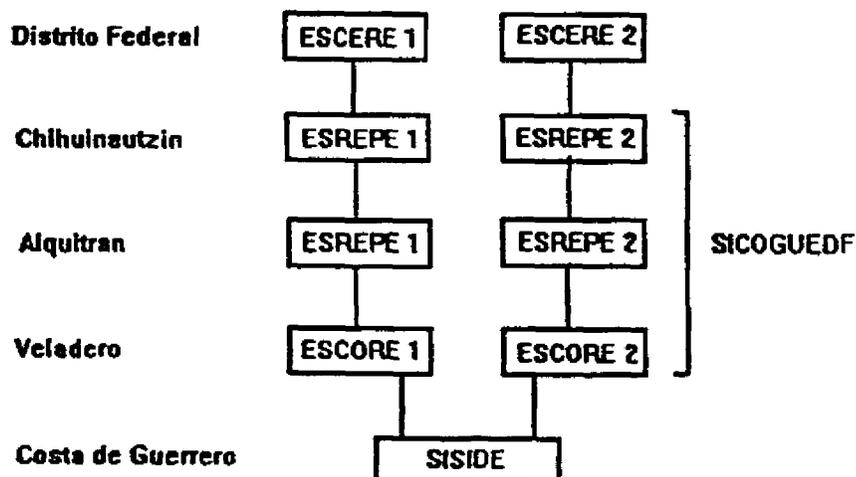


Figura 1. Estructura redundante del SAS

## 3. ANALISIS DE DISPONIBILIDAD

El Sistema de Alerta Sísmica entró en funcionamiento parcial, sin redundancia en agosto de 1991. A partir de esa fecha y hasta julio de 1993 (23 meses) se han registrado 66 fallas, dos de estas fueron totales (3%) y el resto parciales (97%). Las dos fallas totales fueron producidas una por descargas eléctricas durante un huracán y la otra por vandalismo, ambas se originaron en el SICOGUEDF.

### 3.1 Disponibilidad y tiempo muerto del sistema

De los 23 meses de operación del SAS (16,000 hs), el sistema ha quedado fuera de funciones 136 hrs; con fines de mantenimiento preventivo al enlace de radio Acapulco-DF y por mantenimiento correctivo a las fallas fatales. Así, la estimación de la disponibilidad (D) y la fracción de tiempo muerto (M) es.

$$M = 136/16,000 = 0.0085 \dots\dots\dots (1)$$

$$D = 1 - M = 0.9915 \dots\dots\dots (2)$$

Este valor de D es el que presentaba el Sistema hasta el 1 de agosto del presente año, a partir del cual entró en operación el segundo enlace de radio Acapulco-DF que hace al SICOGUEDF un Sistema completamente redundante. El tiempo de respuesta promedio para mantenimiento correctivo de las fallas fatales fue de 36hs.

### 3.2 Fallas relativas a cada subsistema

En la tabla 1 se muestran los porcentajes de las fallas correspondientes a cada subsistema del SAS, se observa que en el periodo que se está considerando, las fallas en el SISIDE ocurrieron en una proporción aproximada de 3 a 1 con respecto a las fallas conjuntas de los otros dos subsistemas.

Nombre del subsistema	N° fallas	Porcentaje
ESCERE	4	4 %
SICOGUEDF	11	20 %
SISIDE	32	76 %

Tabla 1. Porcentajes de fallas relativas a cada subsistema

Origen de las fallas	N° fallas
Vandalismo	4
Baterías y fuentes de alimentación	18
Corrimiento en frecuencia radios	12
Detectores ópticos Fibra óptica	6
Interferencia electromagnética	7
Circuitos electrónicos	6
Programación	2

Tabla 2. Principales causas de fallas

Estaciones de recepción-transmisión	N° fallas
Veladero (Vel)	3
Alquitrán (Alq)	4
Chichinautzan (Chi)	2
Estación Central Registro (ESCERE)	6

Tabla 3. Fallas en los centros de recepción-transmisión.

### 3.3 Causas principales que originaron las fallas

Son 7 las causas principales que originaron las fallas parciales en el SAS, según se muestra en la tabla 2. Se observa además que el 50 % de las fallas las produjeron los corrimientos en frecuencia del equipo Receptor-Transmisor y las fuentes de alimentación (incluyendo baterías).

### 3.4 Fallas en los sitios de recepción-transmisión y en cada estación de campo

La distribución de fallas en los sitios de recepción-transmisión se muestra en la tabla 3 el número de fallas en la ESCERE es mayor que en los otros tres sitios debido a que se consideraron dos fallas de programación (las otras cuatro son por motivos de interferencia o corrimiento de frecuencia en radiotransmisores). Es necesario mencionar que de las dos fallas totales una ocurrió en El Alquitrán por robo de paneles solares y la otra ocurrió en el Veladero durante el paso por la costa de Guerrero del Huracán Calvin el día 7 de julio de 1993, la causa fue la inducción de alto voltaje producido por una descarga eléctrica (rayo). En la tabla 4 se da la distribución de fallas en las doce ESDECA que constutuyen el SISIDE.

Se observa que en las estaciones COR, VIG, CAR y MAR se concentran casi el 70 % de las fallas asociadas con las doce ESDECA.

### 3.5 Histograma del número total de fallas

El histograma de la figura 3 se obtuvo considerando N = 66 muestras (número de fallas) y un rango de 24 meses. El número de intervalos de clase (NIC) se escogió de acuerdo a la regla práctica:

$$NIC = 1 + 3.3 \log_{10} N = 8 \dots\dots\dots (3)$$

Así, la longitud de los intervalos de clase (LIC) es: LIC = 24/8 = 3 meses. La estimación de la media se obtiene a partir de la siguiente expresión:

Estaciones de campo	Clave	N° fallas
Papanao	(Pap)	1
El Veinte	(Vnt)	3
Tetitlan	(Tet)	1
Cacalutla	(Cal)	3
Penjamo	(Pen)	2
Jardin	(Jar)	1
San Pedro	(Spe)	1
Cortes	(Cor)	8
Las Vigas	(Vig)	9
El Carrizo	(Car)	5
Marquelia	(Mar)	7
Huehuetan	(Hue)	1

Tabla 4. Fallas de las estaciones de campo

$$X = \frac{\sum_{i=1}^{MC} f_i m_i}{N} \dots\dots\dots (4)$$

donde  $m_i$  es el punto medio de la LIC (marca de clase) y  $f_i$  es la frecuencia correspondiente, para la varianza tenemos:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^{MC} f_i m_i^2 - \left( \sum_{i=1}^{MC} (f_i m_i) \right)^2 / N}{N - 1} \dots\dots\dots (5)$$

Las estimaciones son: media  $X = 6.5$  meses (mediados de abril de 1992) y varianza  $S^2 = 22$  meses<sup>2</sup>. De la figura 2 se observa que una distribución probabilística lognormal se ajusta al histograma. Asimismo, se observa que después del mes de septiembre de 1992 el sistema se ha estabilizado y el número de fallas tienden a una distribución uniforme. Lo observado en el histograma es lógico dado que cuando un sistema está en su etapa de inicio la probabilidad de falla es grande y a medida que pasa el tiempo (un año en nuestro caso) el sistema se estabiliza.

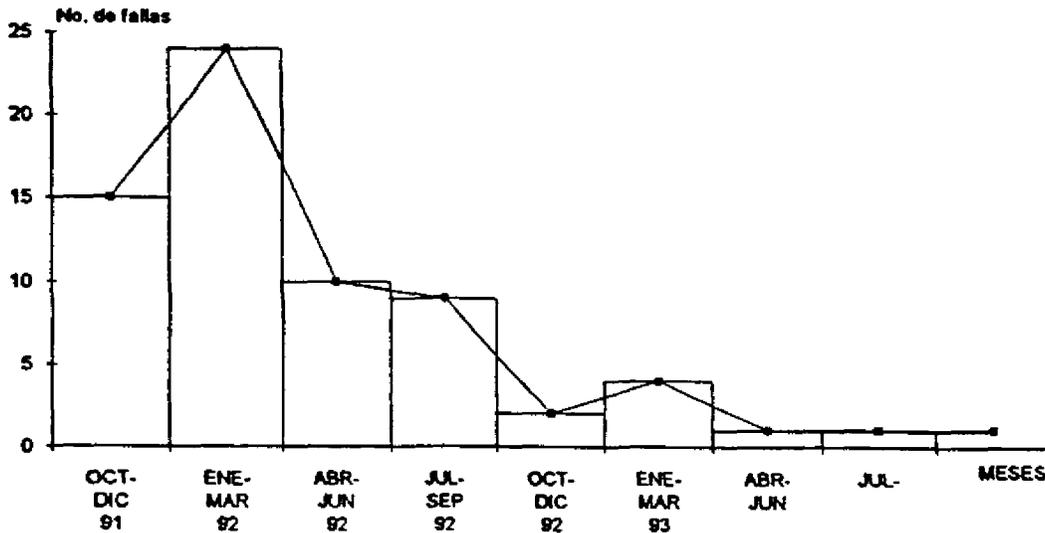


Figura 2. Histograma del número total de fallas

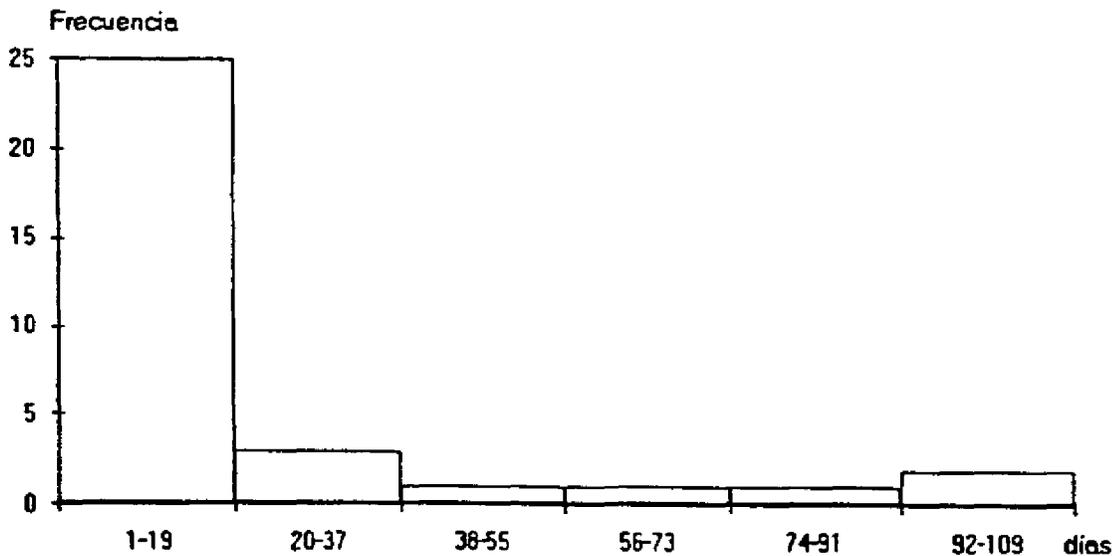


Figura 3. Histograma del tiempo entre fallas

### 3.6 Fechas de ocurrencia de falla por estacion de campo

Hasta septiembre de 1992 las fallas en los doce ESDECA sumó el 85 % de las fallas totales. Después de septiembre el tiempo entre fallas fue de 3 a 4 meses y se produjeron 5 fallas en 10 meses

### 3.7 Fallas de programación

El programa que implementa el algoritmo sismodetector en las ESDECA y el que estima la magnitud del sismo en la ESCERE ha generado falsas alarmas en dos ocasiones. En un caso ruido electrónico causado en el filtro de una fuente fue resuelto como sismo  $M > 6$  y en el otro caso correspondió a la falta de protocolo de comunicaciones entre el transmisor de la Alerta Sísmica y la computadora de control. Dado que los errores de programación se repiten en forma confiable, fue fácil corregir los errores de filtrado y generar el protocolo.

### 3.8 Histograma del tiempo entre fallas

Siguiendo un procedimiento similar al empleado en la obtención del histograma del número total de fallas, en este caso  $N = 33$  (intervalos de tiempo entre fallas) y el NIC se obtuvo a partir de la ecuación (3) con  $NIC = 6$ , asimismo, la LIC es  $108 / 6 = 18$  días. (Wayne *et al*, 1983).

Las estimaciones de media y desviación estándar son:  $X = 19$  días y  $S = 28$  días respectivamente. El valor de la media proporciona una estimación del tiempo medio entre fallas (TMEF) del SAS, es decir:  $TMEF = 19$  días.

El SAS esta formado por un 98% de equipo electrónico y eléctrico y un 2% de partes mecánicas, por lo que se considera para fines de calculo una función de riesgo constante (Goldberg *et al*, 1981) (O'Connor *et al*, 1981) y se utiliza una función de densidad de probabilidad (fdp) exponencial, esto implica que la función de confiabilidad  $R(t)$  del SAS sea de la forma:

$$R(t) = e^{-\lambda TMEF}; t \geq 0 \dots\dots\dots (6)$$

si se considera que el tiempo de mantenimiento al Sistema es de un mes, la confiabilidad de que el SAS siga funcionando después de ese tiempo se calcula considerando que el TMEF es el tiempo entre fallas fatales o catastróficas observado, así,  $TMEF = 180$  días en este caso:  $R(t) = e^{-30/180} = 0.84648$ . Aunque se requieren mas fallas totales para obtener su fdp y así aumentar el nivel de confianza en la estimación del TMEF.

### 3.9 Confiabilidad del sistema con redundancia

La confiabilidad total  $R_T(t)$  en el Sistema con redundancia activa está dada por :

$$R_T(t) = 2 R(t) - R^2(t) \dots\dots\dots (7)$$

si  $R(t) = e^{-\lambda t}$

$$R_T(t) = e^{-\lambda t} (2 - e^{-\lambda t}) \dots\dots\dots (8)$$

donde:

$$\lambda = 1/TMEF = 1/180 \text{ días, para } t=30 \text{ días} \dots\dots\dots (9)$$

se obtiene:

$$R_T(30) = 0.9764 \dots\dots\dots (10)$$

Este resultado es el factor de confiabilidad mostrado por el SAS en 23 meses de operación. Es importante notar que se incluyen los factores asociados a fallas iniciales de puesta en marcha. Este análisis deberá repetirse cuando el Sistema acumule 12 meses más de servicio y estimando los 24 últimos meses de servicio.

## 4. SISMOS DETECTADOS POR EL SISTEMA

El SAS ha detectado un total de 98 sismos en el período de agosto de 1991 a agosto de 1993. En la tabla 5 se presentan las magnitudes sismos  $M \geq 6$  comparadas con los reportados por el Servicio Sismológico Nacional.

	M>6	M<6	Total
SAS	4	5	9
SISMOLOGICO	2	7	9

Tabla 5. Sismos detectados por el SAS

### 4.1 Confiabilidad teórica del algoritmo detector

La confiabilidad del algoritmo detector que actualmente se encuentra implementado en las estaciones de campo ESDECA fue estudiado por el Centro de Investigación Sísmica (CIS) de la Fundación Javier Barros Sierra. Después de generar 684 sismos en forma sintética, concluyen que el Algoritmo detector tiene un 89 % de confiabilidad para detectar sismos de gran magnitud ( $M > 6$ ) (Informe CIS *et al*, 1993).

**SEP**

**SUBSECRETARIA DE SERVICIOS EDUCATIVOS PARA EL D.F.  
DIRECCION DE EMERGENCIA ESCOLAR  
INFORMACION PARA DIRECTORES DE CENTROS DE EDUCACION BASICA  
EN EL DISTRITO FEDERAL, RELATIVA AL SISTEMA DE ALERTA SISMICA**

**PRESENTACION**

Los avances tecnológicos en materia de procesamiento de datos con el apoyo de la computadora y la transmisión de señales de radiocomunicación, han permitido la implementación de novedosos equipos electrónicos en beneficio de los procesos de trabajo y las condiciones de vida de la comunidad.

Tal es el caso del Sistema de Alerta Sísmica ( SAS ), el cual ha sido desarrollado como un elemento de gran ayuda para los habitantes de la ciudad de México ante la presencia de un movimiento telúrico proveniente de la costa de Guerrero, toda vez que permite activar una señal de alerta en alrededor de 50 segundos, antes de que el sismo llegue, lo cual posibilita a las personas el despliegue de diversas acciones conducentes a salvaguardar y minimizar los riesgos hacia su integridad física.

Con el propósito de fortalecer las medidas de seguridad particularmente a través del mencionado Sistema, a continuación se presentan las recomendaciones generales para su observancia en los planteles de educación básica en el Distrito Federal.

**COMO ATENDER LA SEÑAL DEL SISTEMA DE ALERTA SISMICA.**

1. El plantel educativo debe contar con un radio normal, preferentemente portátil que funcione con energía eléctrica y con baterías, de las cuales se deberá de tener un juego de reserva.
2. Se deberá mantener encendida la radio durante todo el horario de labores.
3. El director del plantel asignará a dos personas o más, que habitualmente se ubiquen en un área cercana al sistema de alarma del plantel (sirena, campana etc.) para que sin distraerse

*Que el sistema cuente  
Bateria de 12 V.  
Regulador adecuado para la carga.  
Eliminador de baterías  
sonido.*

de sus actividades cotidianas puedan escuchar la radio permanentemente y, en caso de activarse el SAS puedan hacer sonar dicha señal de alarma para que la comunidad educativa efectúe el procedimiento preestablecido.

4. A las personas que se hayan elegido, deberá de informárseles la importante responsabilidad que tienen encomendada, de ellos depende que se aproveche o no el SAS:.
5. En caso de que se transmita la señal del SAS por la radio, una de las personas asignadas para ello, activará la sirena, campana o la señal predeterminada para que la comunidad educativa de inmediato efectúe las acciones de desalojo, repliegue o alguna otra, según se hayan establecido en el Plan de Acción ante Desastres.
6. Con el apoyo del Comité de Seguridad Escolar, deberá realizarse el seguimiento de la información que las autoridades brindarán por la radio, acerca de lo ocurrido en la ciudad, las condiciones de los inmuebles y de las vías de comunicación, así como de las indicaciones que se emitan a la población para la vuelta a la normalidad.
7. Es importante aclarar que las acciones ante un sismo no deberán supeditarse estrictamente a la activación del SAS, pues en caso de que llegara a fallar o sencillamente en la escuela no se haya escuchado la señal radiofónica por cualquier circunstancia, la dinámica a seguir ante un sismo por la comunidad educativa no modificará las actividades establecidas en el Plan de Acción ante Desastres.
8. Recuerde que los aproximadamente 50 segundos son los que anticipa el SAS la presencia de un sismo, pueden no servir de nada sino se prevee la organización y todas las actividades que se indican en el documento denominado Programa de Actividades del Comité de Seguridad Escolar.
9. En caso de que se activara el Sistema de manera equivocada, es decir que se escuche la señal ante la ausencia de un sismo, el despliegue de actividades deberán considerarse como un simulacro, el cual lejos de perjudicar habrá de servir para evaluar la eficiencia de la organización de la comunidad educativa.

#### **CUANDO NO SE ACTIVARA EL SISTEMA DE ALERTA SISMICA.**

10. Cuando el epicentro de un sismo se ubique en un lugar muy distante a la costa de Guerrero.
11. Cuando el sismo sea de una intensidad menor de 6 grados en la escala de Richter.
12. Cuando el equipo llegue a fallar, aunque la probabilidad es mínima.

## **RECOMENDACIONES PARA INCREMENTAR LA SEGURIDAD EN CASO DE SISMO.**

13. **Suspenda inmediatamente la actividad que esté realizando.**
14. **Cerrar llaves de paso de gas y agua , desconectar la energía eléctrica y abrir las puertas principales de acceso.**
15. **Dirigirse a la zona de menor riesgo que se haya establecido previamente ya sea dentro o fuera del plantel .**
16. **Aléjese de edificios, bardas, marquesinas, vidrios, postes, cables y árboles u objetos que pudieran caerse.**
17. **Después del sismo, realice una inspección del inmueble y revise si no hay daños o riesgos visibles.**
18. **No encienda ningún aparato eléctrico ( incluyendo interruptores de focos o lámparas), ni cerillos, encendedores o velas.**
19. **Si no fue posible antes del sismo, cierre las llaves de gas y desconecte la energía eléctrica y verifique si existe algún desperfecto en las instalaciones.**
20. **Manténgase informado a través de la radio y siga las instrucciones de seguridad que al respecto pudieran surgir.**
21. **Mantenga la calma y ayude a que los demás la conserven esto facilitará las acciones para la vuelta a la normalidad.**
22. **Consulte el documento denominado "Programa de Actividades del Comité de Seguridad Escolar", el cual se entregó a cada uno de los planteles de educación básica en el D.F.**