



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“DESARROLLO DE UN SISTEMA PREDICTOR PARA UNA ALERTA SÍSMICA”

T E S I S

Para obtener el Título de: INGENIERO EN COMPUTACIÓN

PRESENTAN

ARMANDO CUÉLLAR MARTÍNEZ SANDRA RAMOS PÉREZ

Director de Tesis: Ing. Alejandro Jiménez Hernández



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

México, D.F.

1999

275976

14
2ej.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



*A NUESTROS **PADRES** POR TODO EL
SACRIFICIO, AMOR Y COMPRENSIÓN
QUE NOS HAN DADO DURANTE TODA LA VIDA,
Y A NUESTROS **HERMANOS** POR SU
APOYO INCONDICIONAL DE SIEMPRE...*

Agradecimientos

*A nuestra **Universidad** por permitirnos crecer dentro de sus instalaciones, forjando día a día hombres y mujeres comprometidos con la sociedad por muchas generaciones....*

*A nuestra **Facultad de Ingeniería** por permitirnos aprender en sus aulas los conocimientos para enfrentar los problemas que acontecen en nuestra sociedad...*

*Al **Centro de Instrumentación y Registro Sísmico** por el Apoyo otorgado en la realización de esta Tesis.*

*A todos nuestros **Profesores** desde la enseñanza básica hasta la licenciatura, que nos han otorgado parte de su vida reflejada en sus conocimientos, experiencias y dedicación.*

*A nuestros **compañeros y amigos** que con su apoyo y cariño nos alentaron a seguir adelante.*

“ Las batallas de la vida no las gana el más fuerte o el más rápido sino el que decide ganarlas. ”

- Anónimo -

“ Mis conocimientos son el resultado de dos accidentes: el de haber nacido hijo de mi padre por ser quien fue y el haberlo hecho en mi país. ”

- Isaac Asimov -

“ La sabiduría se obtiene a través de la paciencia, la oración y el ayuno. ”

- Hermann Hesse -

“ Si no morimos como vivimos, es porque realmente no fue nuestra vida que vivimos. ”

- Octavio Paz -

“ La angustia y el dolor, el placer y la muerte, no son más que un proceso para existir. La lucha revolucionaria en este proceso, es una puerta abierta a la inteligencia. ”

- Frida Kahlo -

Contenido

	Páginas
PRÓLOGO	VIII
INTRODUCCIÓN	1
I. MARCO DE REFERENCIA	3
A. Conceptos Básicos.....	3
1. Ondas Sísmicas.....	3
1.1. Naturaleza de las Ondas Sísmicas.....	5
1.2. Características.....	5
Ondas de Cuerpo P y S.....	5
Ondas Superficiales Love y Rayleigh.....	6
Ondas Longitudinales y Transversales.....	8
Momento Sísmico.....	9
Intensidad Sísmica.....	10
Magnitud y Energía Sísmica.....	10
2. Sistema de Alerta Sísmica de la Ciudad de México (SAS)	11
2.1. Sistema de Detección Sísmica.....	12
2.2. Sistema de Telecomunicaciones Guerrero-México	13
2.3. Sistema de Control Central.....	14
2.4. Sistema de Prevención por Radio para usuarios..	15
B. Definición del Problema.....	16
C. Justificación.....	17
D. Objetivo.....	18

II. MÉTODO	19
A. Sistema Predictor de Sismos.....	19
1. Predicción Sísmica.....	19
2. El Potencial Sísmico.....	20
2.1. Modelo de tiempo predecible.....	20
2.2. Modelo de corrimiento predecible.....	20
B. Sistema de Alerta Sísmica.....	21
1. Conceptos Básicos en la Detección Temprana de un Sismo	21
1.1. Método de Frente de Onda.....	22
1.2. Método de Detección de Onda S.....	22
1.3. Método de Detección de Onda P.....	22
C. Sistema Predictor para una Alerta Sísmica.....	23
1. Modelo Matemático del Predictor.....	23
III. ANÁLISIS DE DATOS	25
A. Registro Sísmico.....	25
1. Estaciones de Campo ESDECAS.....	25
2. Criterio de Selección de Registros.....	27
B. Obtención de Parámetros.....	30
1. Tiempo S-P.....	30
2. Distancia Hipocentral.....	34
2.1 Cálculo de la distancia hipocentral.....	36
2.2 Cálculo de velocidad promedio V_p	36
3. Aceleración Máxima.....	39
4. Frecuencia Dominante.....	40
IV. DETERMINACIÓN DE PREDICTOR	42
A. Desarrollo del Modelo Matemático Predictor.....	42
B. Cálculo de las constantes de Ajuste.....	43
C. Error promedio del Predictor.....	46

V. DIAGRAMAS DE FLUJO	47
A. Diagrama de flujo para la obtención de parámetros.....	48
B. Diagrama de flujo para el Predictor.....	50
VI. PRUEBAS	51
A. Comparación Inicial.....	51
B. Cálculo de Predictores.....	53
1. San Pedro.....	54
1.1 Distancia Hipocentral.....	54
1.2 Predictor para San Pedro.....	55
2. Las Vigas.....	56
2.1 Distancia Hipocentral.....	56
2.2 Predictor para Las Vigas.....	57
3. El Carrizo.....	58
3.1 Distancia Hipocentral.....	58
3.2 Predictor para El Carrizo.....	59
C. Comparación Final.....	60
VII. RESULTADOS	61
VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	63
CONCLUSIONES	65
REFERENCIAS	67
TABLA A	69
TABLA B	71

PRÓLOGO

Las fuerzas naturales surgen inesperadamente, y en ocasiones provocan destrucción humana y material, por ello, el hombre ha tenido la necesidad de desarrollar su instinto de supervivencia y con ingenio crear instrumentos que lo ayuden a prevenir y mitigar sus efectos dañinos. Los sismos o terremotos son un ejemplo de estas fuerzas naturales.

Después de más de 30 años de investigaciones orientadas a predecir los sismos, la posibilidad de indicar el lugar, fecha y magnitud de un sismo, para prevenir y mitigar sus efectos desastrosos es incierta. Sin embargo, el avance actual en instrumentación sísmica, telecomunicaciones y computación, ha permitido la implementación de sistemas para conocer simultáneamente cuando un sismo está ocurriendo en una localidad.

Un sistema de este tipo consiste de sensores colocados en áreas sísmicas vinculados con medios para alertar en lugares donde puedan sufrir daños, como áreas urbanas o industriales relativamente alejadas del epicentro. Se aprovecha la diferencia de velocidad de propagación entre ondas sísmicas y electromagnéticas, para enviar una señal de alerta segundos o decenas de segundos antes de que las ondas sísmicas originadas por un sismo fuerte arriben al lugar vulnerable a alertar.

El Sistema de Alerta Sísmica (SAS) mexicano, diseñado y construido por el

Centro de Instrumentación de Registro Sísmico (CIRES) de la Fundación Javier Barros Sierra, A. C., ha sido auspiciado durante 9 años, por autoridades del Distrito Federal y actualmente es un sistema de prevención de alerta sísmica temprana, reconocido en el mundo como el único que da aviso al público. En el CIRES, además de asegurar las actividades de operación y conservación del SAS se promueve la evaluación continua del funcionamiento de todas sus partes y subsistemas, así como los programas de cómputo que controlan sus acciones y aquellos relacionados con la capacidad de reconocer el inicio de un sismo y pronosticar la magnitud que podría tener la condición necesaria para emitir un aviso público de alerta sísmica confiable.

La finalidad de este trabajo es proponer un nuevo modelo matemático de predicción de magnitud utilizando el inicio de la señal sísmica que pueda mejorar la oportunidad de los avisos de alerta sísmica del SAS.

La función principal de los equipos de Guerrero es enviar datos para la posible emisión de una alerta sísmica cuando un sismo es detectado. El proceso de evaluación de los datos provoca en ocasiones registrar en forma incompleta la señal sísmica, problemática con la cual nos enfrentamos durante el análisis de datos para analizar la operación del sistema y determinar su efectividad.

INTRODUCCIÓN

La posibilidad de reducir la pérdida de vidas cuando ocurran sismos fuertes, se puede mejorar si logramos aumentar la calidad de las construcciones y aprovechar la información que puedan proporcionar desarrollos tecnológicos para aviso anticipado, como el Sistema de Alerta Sísmica de la Ciudad de México. Es importante perfeccionar el funcionamiento de esta tecnología, y entrenar a los posibles usuarios para aprovechar su aviso oportuno.

En la presente obra se explicará cómo a través del análisis de varios parámetros de una señal sísmica, diseñados en un modelo matemático, es posible obtener un modelo predictor de la magnitud de un sismo, útil para enviar una alerta oportuna a la población.

El trabajo consta de ocho capítulos, en el primer capítulo **MARCO DE REFERENCIA** se presentan conceptos básicos de sismología usados a lo largo de esta obra, también se explica el funcionamiento y estructura del Sistema de Alerta Sísmica de la Ciudad de México, lo que aportará una mejor comprensión al lector para entender de qué partes consta un Sistema de Alerta Sísmica. Además, se

incluye la definición del problema a resolver, así como la justificación y el objetivo del trabajo.

En el segundo capítulo **MÉTODO** se describen los modelos y métodos más conocidos y utilizados por investigadores para el desarrollo de un Sistema de Alerta Sísmica.

En el tercer capítulo **ANÁLISIS DE DATOS** se describen los registros sísmicos empleados, el criterio de selección y la descripción de los parámetros seleccionados como representativos de las señales sísmicas.

En el cuarto capítulo **DETERMINACIÓN DEL PREDICTOR** se realiza el desarrollo que nos conducirá a obtener el modelo predictor. Una vez conocida la relación que guardan los parámetros analizados en el capítulo tres con respecto a la magnitud sísmica, se procede al cálculo de las constantes de ajuste del modelo, para obtener al final del capítulo una gráfica comparativa entre la Magnitud estimada por el Predictor y la Magnitud calculada por el Servicio Sismológico obteniendo así el error promedio del predictor.

En el quinto capítulo **DIAGRAMAS DE FLUJO** se muestra la descripción del sistema predictor desde la obtención de los parámetros provenientes de la Costa de Guerrero, hasta que llegan a la Cd. de México (CIRES), para su evaluación como sismo o evento, y en caso de sismo determinar el tipo de alerta que será emitida.

En el sexto capítulo **PRUEBAS** se presentan dos tablas comparativas, la primera muestra el número de aciertos obtenidos por el modelo actual del SAS y por el propuesto, en base a la magnitud registrada por cada uno de ellos; se realizan pruebas a tres estaciones considerando un modelo predictor para cada una de ellas, cuyos resultados se muestran en la segunda tabla. También se presentan gráficas de los Predictores calculados para las tres estaciones seleccionadas.

En el séptimo y octavo capítulo **RESULTADOS y DISCUSIÓN DE RESULTADOS** se discuten los resultados con base en el objetivo propuesto.

I. MARCO DE REFERENCIA

A. Conceptos Básicos

Se exponen conceptos teóricos del estudio y medición de las ondas sísmicas, así como el estudio histórico de éstas. Se presenta información sobre el Sistema de Alerta Sísmica de la Ciudad de México (SAS) elaborado por el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRES), quien proporcionó la mayor parte de la información para este trabajo.

1. Ondas Sísmicas

El concepto de onda representa una de las grandes conquistas unificadoras de la física. Hacia 1480 escribía Leonardo da Vinci que el impulso es más veloz que el agua, puesto que la ola suele huir de su lugar de origen mientras el agua permanece. Es como el oleaje que el viento produce en un tragal, cuando se ven olas que recorren el campo y sin embargo las espigas no se mueven de su lugar. Aquí se describe la esencia del fenómeno: el movimiento se propaga y el material permanece.

En el siglo XIX, se crearon las bases matemáticas para aprovechar plenamente la teoría de las ondas. Al principio se pensaba que las ondas sísmicas eran de una sola clase, iguales a las del sonido. Hacia 1840, el francés Lamé predijo la existencia de ondas sísmicas de corte, más lentas que la onda del sonido. Posteriormente se comprendió que las fuerzas liberadas en la tierra por dislocación de fallas dan lugar a ondas. Las ondas sísmicas se generan en las placas deslizantes, y se transmiten como ondas de cuerpo hasta la superficie de la Tierra, una vez allí se propagan como ondas superficiales. En los primeros sismogramas pudieron identificarse ambas ondas, que en un inicio se llamaron simplemente "onda primera" y "onda segunda" y hasta hoy se conocen en sismología por las iniciales P y S.

Hacia el término del siglo XIX, John Strutt (Lord Rayleigh) elaboró la teoría de las ondas superficiales llamadas Rayleigh y, finalmente hacia 1905, A. E. H. Love completó la teoría y dio su nombre a la cuarta onda sísmica: la onda superficial de cortante. Tenemos entonces dos tipos de ondas de cuerpo (P y S), y dos superficiales (Love y Rayleigh). Las ondas P son longitudinales y entrañan variaciones de volumen, las ondas S son transversales, se propagan sin cambios de volumen y son análogas a las ondas de cuerdas vibrantes, en general, las ondas P y S se propagan por el interior de un cuerpo sólido.

En todo los casos, lo que se transmite a través de una onda en movimiento, es energía. Un movimiento sísmico tiene una energía considerable, que puede llegar a un millón de millones de millones de calorías, equivalente a más de 30,000 bombas nucleares del tipo de Hiroshima. Esta energía se reparte entre las cuatro formas de ondas y se propaga por la tierra sólida [6].

1.1. Naturaleza de las Ondas Sísmicas

Una deformación que viaja a través de un medio elástico se llama onda elástica, y cuando el medio a través del cual se desplaza es la Tierra, se llama onda sísmica. Un material totalmente plástico no puede almacenar energía elástica; por lo tanto los sismos se deben al comportamiento elástico de la Tierra.

Las fuerzas liberadas en la Tierra por dislocación de fallas dan lugar a ondas de cuerpo. Las ondas sísmicas se generan en placas deslizantes, y se transmiten como ondas de cuerpo hasta la superficie de la Tierra, una vez allí se propagan como ondas superficiales [4].

Los terremotos superficiales son los que producen la mayor devastación y los que contribuyen aproximadamente a las tres cuartas partes de la energía total liberada por terremotos en todo el mundo [5].

1.2. Características

Ondas de Cuerpo P y S

Las ondas de cuerpo u ondas internas pueden ser de dos tipos: compresionales y de corte. Las ondas compresionales son las que se transmiten cuando las partículas del medio se desplazan en la dirección de propagación, produciendo compresiones y dilataciones en el medio. Si el medio por el cual se propagan es la Tierra se les llama ondas P o Primarias, ya que son las que se transmiten a mayor velocidad que otras ondas sísmicas¹. En la figura 1.a se muestra el comportamiento de la onda P en un cuerpo sólido.

¹ Ésta es la más veloz de todas las ondas sísmicas (más de 5 km/s en las rocas graníticas cercanas a la superficie y alcanza más de 11 km/s en el interior de la Tierra) y por lo tanto es la primera en llegar a cualquier punto, por lo que se le conoce como onda primaria o P (Nava Alejandro, [Terremotos, 1989](#))

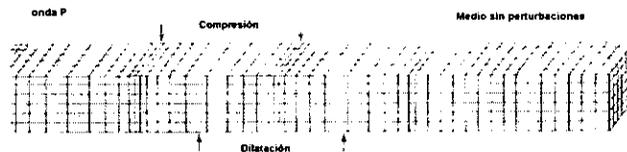


Fig. 1.a Onda P

Las ondas de corte son llamadas ondas S, en donde las partículas del medio se desplazan perpendicularmente a la dirección de propagación por lo que están asociadas con deformaciones del terreno. Éstas son las segundas en arribar de ahí el nombre de ondas secundarias o S.² En la figura 1.b se muestra el comportamiento de la onda S en un cuerpo sólido.

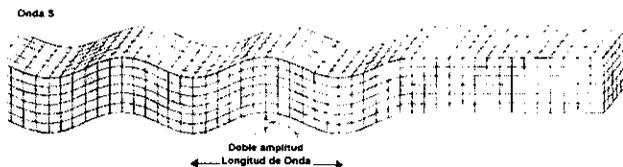


Fig. 1.b Onda S

Ondas Superficiales Rayleigh y Love

Las ondas superficiales son causadas por la interferencia de las ondas de cuerpo (la interacción de muchas ondas de cuerpo que viajan en diferentes direcciones) mostrando nula amplitud en la profundidad de la Tierra y una máxima amplitud en la

²La onda S es más lenta que la onda P, en una amplia gama de rocas su velocidad V_s es aproximadamente igual a la velocidad de la onda P (V_p) dividida entre $\sqrt{3}$ (esto es conocido como condición de Poisson). idem p. 89

superficie. Éstas son de dos tipos: ondas de Rayleigh y ondas de Love, las cuales son más lentas que las de cuerpo.

El período de las ondas Rayleigh es muy largo debido a la interacción entre las ondas P y las ondas S, y el movimiento de cada partícula de la superficie al paso de la onda se da en forma de elipse retrógrada. Las ondas Rayleigh son las más lentas con velocidades que van de 1 a 4 km/s. En la figura 1.c se muestra el comportamiento de la onda Rayleigh en un cuerpo sólido.

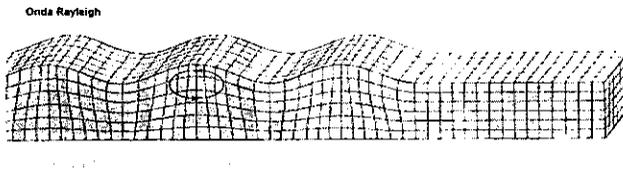
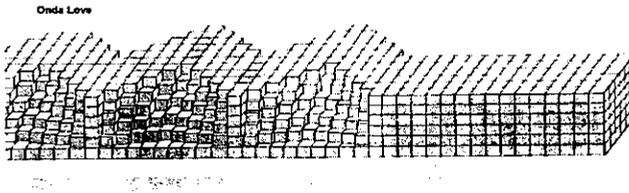


Fig. 1.c Onda Rayleigh

Las ondas Love son de período muy largo, se comportan de manera muy parecida a las ondas Rayleigh. Aunque son más lentas que las ondas de cuerpo, las ondas Love (alcanzan velocidades de 1 a 4.5 km/s) son más veloces que las Rayleigh [12]. En la figura 1.d se muestra el comportamiento de la onda Love en un cuerpo sólido.

Fig. 1.d Onda Love³

Ondas longitudinales y transversales

La trayectoria del movimiento sísmico proyectado por un punto forma una curva determinada por su proyección sobre tres ejes ortogonales: un eje vertical y dos horizontales normales entre sí en dos direcciones N-S y E-O.

Una perturbación brusca en el interior de un cuerpo elástico, ilimitado, homogéneo e isótropo origina dos clases de ondas: una serie de ondas longitudinales con igual dirección que la propagación que provocan efectos de dilatación y compresión, y que se propagan en forma radial con centro en el origen de la perturbación; el otro tipo de ondas normales a la dirección de ondas longitudinales llamadas ondas transversales, únicamente provocan deformaciones transversales, normales a su dirección de propagación.

Las ondas longitudinales provocan deformaciones volumétricas variables y sucesivas en los cuerpos donde se propagan que pueden ser sólidos o gaseosos. En cambio las ondas transversales por su acción de esfuerzo cortante sólo afectan a la forma del elemento pero no a su volumen y no pueden propagarse en los medios líquidos o gaseosos [3].

³ Las figuras 1.a, 1.b, 1.c y 1.d fueron tomadas de Bruce A. Bolt, Nuclear Explosions and Earthquakes W. H. Freeman and Company, 1976.

La siguiente gráfica (fig. 2) muestra el inicio de la onda P y de la Onda S, del sismo ocurrido el 14 de mayo de 1993 de $M=6$ registrado por la estación No. 9 Las Vigas, (vg140593.tx2) tomado del Sistema de Alerta Sísmica (SAS). El registro sísmico describe la aceleración en escala de G (en donde G es la aceleración de la Tierra, aprox. 9.8 m/s^2) en el tiempo, el cual es medido en segundos, cabe señalar que todas las gráficas de registro sísmico que se muestren, tendrán estas unidades.

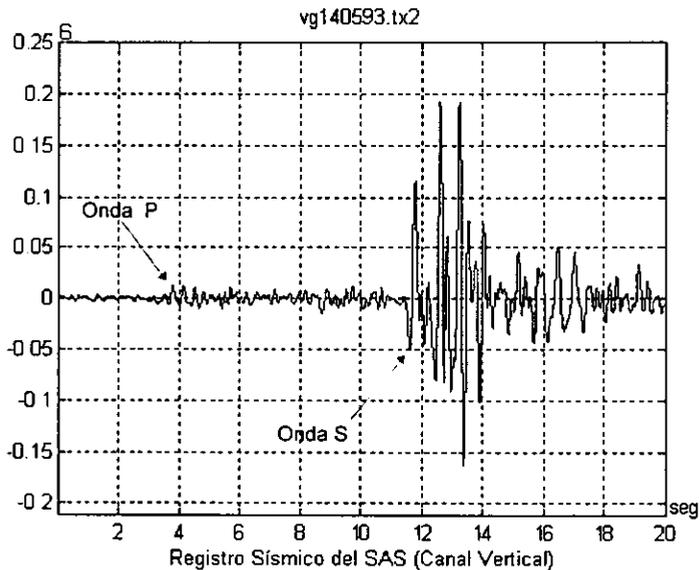


Fig. 2 Registro Sísmico

Momento sísmico

El momento sísmico escrito comúnmente como M_0 , depende del área de ruptura de un terremoto, de la rigidez del terreno y del corrimiento en la falla.

Intensidad sísmica

La intensidad es una medida de los efectos causados por un sismo en un lugar determinado de la superficie terrestre. Es decir, un sismo puede tener varios niveles de intensidad dependiendo el lugar donde éste se presente.

$$I = 8.16 + 1.45M - 2.46\log D \quad (1)$$

donde:

M es la magnitud sísmica.

D es la distancia (en kilómetros) de la fuente al punto de observación.

Magnitud y Energía Sísmica

C. Richter definió en 1935 el concepto de Magnitud M_L (ecuación 2) pensando en un parámetro que describiera de alguna manera la energía sísmica liberada por un terremoto.

$$M_L = \log(A_{\max}) - \log A_0D \quad (2)$$

donde:

A_{\max} es la máxima amplitud observada en un sismógrafo Wood-Anderson de péndulo horizontal sencillo.

A_0 es la amplitud que debe tener a esa distorsión un sismo de magnitud cero.

D es el corrector de distancia entre el sismógrafo y el lugar del epicentro.

La magnitud de Richter tiene dos problemas graves: un sismo fuerte satura los sismómetros cercanos a él; es decir, produce ondas con amplitud mayor a la que pueden registrar los aparatos, resultando en registros que aparecen truncados. Otro problema es que la ruptura asociada con un sismo fuerte dura bastante tiempo y radia energía durante todo este tiempo. La definición M_L de magnitud se refiere solamente a una característica del sismograma, leída con un instrumento de periodo corto, y no se puede distinguir entre un sismo que genere un pulso de una amplitud determinada y otro que produzca varios pulsos de la misma amplitud.

En general cualquier medida de magnitud se satura cuando el periodo dominante de las ondas observadas es menor que el tiempo de ruptura de la fuente sísmica.

Para evitar este efecto, actualmente se utilizan escalas de magnitud basadas en medidas de períodos mucho más largos [12]. Por ejemplo, la magnitud del momento M_w cuyo valor se calcula a partir del logaritmo del momento sísmico M_o como:

$$M_w = 2/3 \cdot \log M_o - 10.7 \quad (3)$$

$$M_o = \mu \cdot A \cdot d \quad (4)$$

donde:

μ es la rigidez de la roca.

A es el área de falla.

d es la distancia de desplazamiento.

Para cuantificar los sismos lejanos se utilizan comúnmente dos escalas: la magnitud de ondas de cuerpo M_b y la magnitud de ondas superficiales M_s . Existe otro tipo de magnitud basada en la longitud de coda⁴ de los sismos llamada M_c .

2. Sistema de Alerta Sísmica de la Ciudad de México (SAS)

El objetivo de este sistema es mitigar los efectos de temblores generados en las costas de Guerrero⁵. El SAS ha estado operando como un sistema experimental desde agosto de 1991. Las costas de Guerrero forman parte de la zona de subducción de México con gran actividad sísmica en donde se ha previsto la

⁴ Después de la llegada de las ondas S y P, vemos que la señal en el sismograma decae poco a poco. Esta parte de la "cola" de la señal se llama coda y se debe a la energía sísmica "dispersa" que llega hasta el sensor después de haber sido reflejada por las heterogeneidades propias del terreno

⁵ Las costas de Guerrero se encuentran situadas sobre una brecha sísmica madura con posibilidades de registrar uno o más temblores de magnitud cercana a M8 en los próximos años

ocurrencia de un sismo de magnitud igual o mayor que el registrado el 19 de septiembre de 1985 [1].

Con el SAS se obtiene una ventaja de 60 seg. en promedio para un aviso temprano antes de que el temblor que está ocurriendo en las costas de Guerrero, arribe a la Ciudad de México a una distancia de 320 km. El sistema consiste de cuatro partes:

- Sistema de Detección Sísmica
- Sistema de Telecomunicaciones Guerrero-México
- Sistema de Control Central
- Sistema de Alertamiento por Radio para usuarios

Cuando un temblor es detectado por las estaciones de campo (doce estaciones distribuidas sobre las costas de Guerrero), los mensajes codificados son enviados al sistema de control central de la Ciudad de México, donde éstos son procesados y evaluados. Si el sistema de control central determina que el evento es de $M_L \geq 6$ ó $5 \leq M_L < 6$, y dos o más estaciones detectan el mismo evento sísmico, una señal codificada es transmitida a la población para activar la alerta de radio receptores instalados en escuelas, unidades habitacionales, agencias gubernamentales mexicanas, estaciones de radio y servicios públicos [7].

2.1. Sistema de Detección Sísmica

Consiste en 12 estaciones acelerométricas digitales de campo distribuidas a intervalos de 25 km. a lo largo de la costa de Guerrero. Cada estación de campo realiza la detección y análisis del evento local para estimar su energía y la velocidad de crecimiento de la energía sobre el sitio. Esa información es enviada al sistema de control central en la Cd. de México, donde ésta es comparada con una función (construida con registros históricos) para determinar la magnitud del evento

detectado. Si alguna otra estación envía un mensaje equivalente que corresponda al mismo evento, entonces se difunde una alerta de prevención temprana

Cada estación de campo detecta eventos sísmicos, en distancias focales menores de 100 km. Así, el área cubierta por el sistema o la ventana de adquisición es aproximadamente de 450 km. de longitud y 200 km. de ancho. Este hecho ha sido considerado en el diseño del algoritmo de disparo del SAS. El detector de señal sísmico es del tipo de cociente de Promedio Corto sobre Promedio Largo. Cada estación de campo identifica en tiempo real las fases P y S de las ondas de arribo sísmico, y el algoritmo usa el promedio cuadrado de las señales de entrada como una función característica para detectar y evaluar la magnitud de la energía liberada por el sismo.

Si la energía excede un umbral determinado, entonces la fase P ha sido detectada, y un segundo umbral es usado para detectar el arribo de la fase S. El algoritmo se afinó con temblores de magnitudes $M > 5$. Los datos de la red Acelerográfica de Guerrero se usaron para calibrar el algoritmo de disparo. Después de la detección y evaluación del nivel de energía de la primera llegada de una señal, la estación de campo determina si se envía un mensaje a la estación central en la Cd. de México. Una vez que este mensaje es enviado, no es revaluado por la estación de campo.

2.2. Sistema de Telecomunicaciones Guerrero-México

El sistema de comunicación está basado en una Estación de Transmisión de Radio VHF cerca de Acapulco y tres Estaciones de Transmisión de Radio VHF distribuidas entre Acapulco y la Cd. de México. Para mejorar la confiabilidad, el SAS fue diseñado para ser redundante con dos rutas de comunicación independientes, enviando los datos duplicados a través de diferentes frecuencias de radio. Adicionalmente, cada doce horas una estación de campo genera y transmite su

propio código de señal para indicar que está operando correctamente y verificar el lazo de radio comunicación.

2.3. Sistema de Control Central

El sistema de control central es también un sistema dual redundante. Cada subsistema incluye una microcomputadora 486 IBM PC compatible, un radio receptor y un radio transmisor. El Sistema de Control Central está localizado en las instalaciones del CIRES en la Cd. de México. El mensaje recibido desde las estaciones de campo de Guerrero es procesado y considerado válido sólo si un sismo es detectado por dos o más estaciones de campo.

Este sistema tiene definidos dos umbrales de alertamiento al público: sismo fuerte ($M \geq 6$) y sismo moderado ($6 > M \geq 5$). Cuando se determina un temblor fuerte o moderado, un mensaje de alerta correspondiente es automáticamente transmitido por el transmisor de radio VHF localizado en la Estación de Control Central. En caso de ambigüedad entre dos estaciones con mensajes de sismos fuerte y moderado, el mensaje con menor magnitud es el único que se transmite.

Existen dos señales que pueden ser emitidas al público:

- Alerta general a todo el público cuando el evento satisface la condición de sismo fuerte. Ésta dispara las estaciones de radio comerciales AM y FM equipadas con radio receptores telecontrolados por el CIRES.
- Alerta restringida cuando el evento es sismo moderado, que dispara los radio receptores telecontrolados del CIRES en escuelas y otros lugares que usan esta señal para entrenamiento.

2.4. Sistema de Prevención por Radio para usuarios

Cuando un aviso de alerta es emitido por el radio transmisor del Sistema de Control Central, el público tiene tres formas posibles de recibirlo, es decir, hay tres diferentes tipos de radio receptores: a) hechos por el CIRES, b) radio receptores comerciales estándar AM/FM y c) receptores digitales.

Actualmente hay dos tipos de radio receptores del CIRES: uno tiene la finalidad de advertir cuando se detecta un sismo fuerte. El otro se activa cuando se detectan sismos fuertes o moderados, y está instalado en lugares donde se realiza entrenamiento de desalojo con éstas señales.

La confiabilidad del algoritmo detector que actualmente se encuentra implementado en las estaciones de campo, ESDECAS, fue estudiado por el Centro de Investigación Sísmica (CIS) de la Fundación Javier Barrios Sierra. Después de generar 684 sismos en forma sintética, se concluyó que el Algoritmo detector tiene un 89% de confiabilidad para detectar sismos de gran magnitud ($M > 6$) [9].

Desafortunadamente, algunos eventos sísmicos menores a $M < 5$ han activado el sistema de alerta, lo que genera poca credibilidad y confianza en la población.

Se muestra en la figura 3 un reporte del resultado que el SAS obtuvo del sismo de $M=7.3$ ocurrido en la costa de Guerrero el 14 de septiembre de 1995, que generó una alerta general en la Cd. de México.

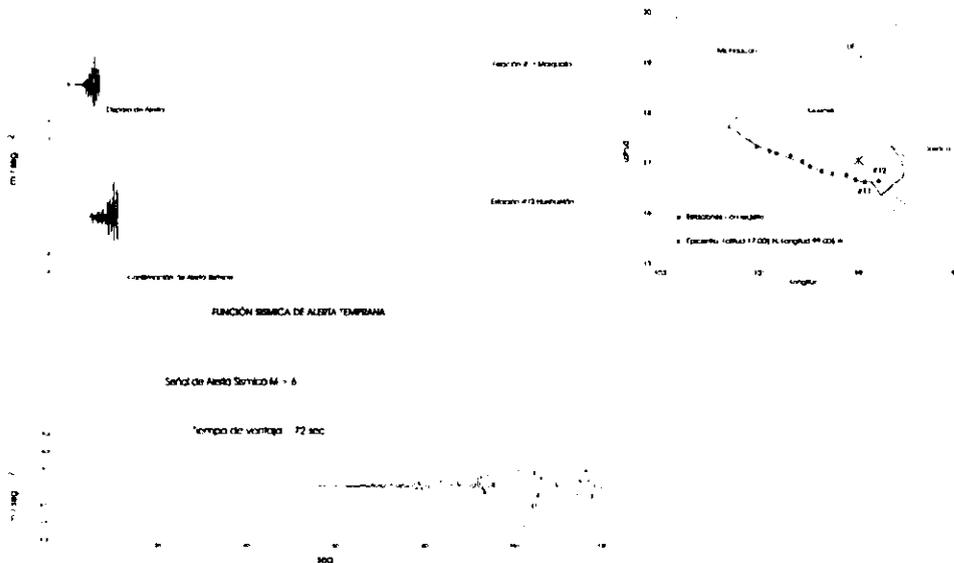
CENTRO DE INSTRUMENTACIÓN Y REGISTRO SÍSMICO, AC

SISTEMA DE ALERTA SÍSMICA

Resultado durante el sismo del 14 de Septiembre de 1995 en Guerrero, M 7.3

hora -- 08:04:35 (tiempo local)

REGISTRO DE ACELERACIÓN DE LAS ESTACIONES DE CAMPO EN GUERRERO



B. Definición del Problema

El contar con un recurso que permita tener un aviso temprano de la ocurrencia de un sismo fuerte con inminente arribo a la Cd. de México tiene un alto valor social. Un sistema así, permite mitigar daños, salvar vidas y activar anticipadamente equipos de emergencia. Si este recurso contempla un predictor de magnitud que tenga un índice bajo de falsas alertas y de alertas no transmitidas, logrará mayor credibilidad y confianza entre la población.

C. Justificación

Actualmente se hace indispensable la consideración de un sistema de detección de sismos que mitigue daños severos e irreversibles a poblaciones grandes o pequeñas, por lo que es importante contar con un sistema de alerta sísmica.

Indudablemente se ha palpado la importancia de un sistema de alerta sísmica así como su constante mejora ante la ocurrencia de un sismo, como el ocurrido el 19 de septiembre de 1985 en México, y como el sismo del 25 de enero de 1999 en Colombia, en donde tuvo lugar un sismo con magnitud 6.0 con más de 1,000 muertos. El gobierno de este país ha iniciado las acciones necesarias para lograr a corto plazo que el Instituto encargado de la detección de sismos denominado INGEOMINAS logre mejorar el sistema con el que actualmente cuenta, a través de la instalación de sismógrafos y acelerógrafos en la zona epicentral para continuar con el monitoreo de actividad sísmica (réplicas) y dar las recomendaciones respectivas, entre otras actividades [2].

Japón es un país que constantemente presenta movimientos sísmicos, y cuenta con una tecnología de vanguardia, y un sistema de alerta temprana de sismos denominada UrEDAS (Urgent Earthquake Detection and Alert System) capaz de generar señales de prevención con el análisis de los datos obtenidos en los primeros 4 segundos del inicio de un sismo [10].

Recientemente se han iniciado pláticas con el CIRES (Centro de Instrumentación y Registro Sísmico) y el Dr. Yutaka Nakamura responsable del sistema de alerta sísmica en el tren bala de Japón y que actualmente es presidente de la compañía System and Data Research (empresa desde la cual continúa promoviendo el uso de UrEDAS), con el fin de colaborar conjuntamente en actividades como: a) el establecimiento de una variante del Sistema de Alerta Sísmica, para investigar un posible incremento del tiempo de aviso anticipado en la Cd. de México, así como su posible aplicación en ciudades y puertos importantes del

estado de Guerrero; b) el desarrollo de tecnologías de mitigación de desastres y respuesta a emergencias, c) investigación de la respuesta del sector social que participe en el uso de este recurso; y, d) el desarrollo de métodos de evaluación de suelos y estructuras para determinar factores de riesgo.

Lo anterior hace imperante una mejora continua del sistema con el que actualmente cuenta el CIRES, y el estudio e investigación de un Sistema Predictor de Alerta Sísmica, que ayude a mejorar el disparo temprano de la alerta.

D. Objetivo

Se desarrolla un sistema para establecer un predictor de la magnitud de un sismo tomando únicamente los primeros segundos de su inicio para su utilización en sistemas de alerta sísmica. Este sistema se diseña para utilizarse en una alerta sísmica para la brecha de Guerrero.

A través de una metodología para la depuración de resultados, tomando como referencia registros sísmicos históricos, así como la información de los mismos, se desarrolla el análisis que mejore la obtención del predictor de magnitud.

II. MÉTODO

Antes de definir el método a utilizar, es importante tener claro los conceptos de un Sistema Predictor de Sismos y un Sistema de Alerta Sísmica que ayuden a comprender la metodología a seguir para alcanzar el objetivo enunciado en este trabajo.

A. Sistema Predictor de Sismos

1. Predicción sísmica

La especificación anticipada de la magnitud con localización epicentral y tiempo de ocurrencia de un sismo, dentro de un nivel de confianza dado se denomina predicción sísmica.

Una predicción es a largo plazo cuando el intervalo de anticipación cubre desde años hasta décadas, a mediano plazo cuando el intervalo va desde semanas hasta años, y a corto plazo cuando cubre desde horas hasta semanas [12].

Una predicción sísmica ideal predice la magnitud de un sismo con variaciones de ± 0.2 grados de magnitud, de unos cuantos kilómetros para el epicentro y de unas cuantas horas para el tiempo.

2. El potencial sísmico

El potencial sísmico de un lugar determinado es la posibilidad de que, en un intervalo de decenios, siglos o milenios pueda ocurrir en él un gran terremoto. Existen dos modelos para el cálculo de la predicción sísmica en base a su potencial: el modelo de tiempo predecible y el modelo de corrimiento predecible.

2.1. Modelo de tiempo predecible

Dice que los sismos ocurren cuando el esfuerzo alcanza un valor determinado; por lo tanto, si conocemos ese nivel y sabemos cuál fue la caída de los esfuerzos del sismo anterior y la velocidad con que se acumulan los esfuerzos, podemos predecir cuándo ocurrirá el siguiente, pero no podemos decir qué tan grande será.

2.2. Modelo de corrimiento predecible

Dice que cada vez que ocurre un sismo, el nivel de esfuerzos en la falla baja a un valor determinado, para lo cual el corrimiento de falla en un sismo dado, debe ser tal que reponga la deficiencia de corrimiento que causa el esfuerzo. De esta manera sabemos qué tan grande será el sismo pero no podemos saber el momento en que pueda ocurrir.

B. Sistema de Alerta Sísmica

La función básica de un sismómetro del tipo preventivo es dar una alerta sísmica cuando la aceleración máxima del movimiento sísmico excede el nivel de aceleración de un umbral previamente establecido.

Un sistema de alerta sísmica convencional emite una alerta del sismo basándose en el máximo movimiento del sismo, y en la evaluación de la energía del sismo, dicha evaluación principia simultáneamente con el estado inicial del movimiento sísmico.

1. Conceptos Básicos en la Detección Temprana de un Sismo

El lugar donde el rompimiento de un sismo se detecta en el menor tiempo posible, es en el área más cercana al epicentro. En un lugar distante al epicentro, el movimiento sísmico al inicio es menor y después de cierto tiempo el lugar es sacudido abruptamente por un gran movimiento en la superficie [5].

Este fenómeno es atribuido a la diferencia en las velocidades de propagación de dos tipos de movimientos de ondas (la onda longitudinal u onda primaria y la onda transversal u onda secundaria), las cuales son radiadas simultáneamente desde el epicentro. La onda primaria (onda P), con una mayor velocidad de propagación llega primero, esto es usualmente un temblor menor. Sólo después de que la onda secundaria llega (onda S), aparece el movimiento principal, donde generalmente se asume que ocurrirá el daño sísmico.

1.1. Método de Frente de Onda

Los movimientos de los sismos son detectados tan tempranamente posible como cerca se encuentren los sismómetros con respecto del epicentro. Considerando lo anterior, se seleccionan los puntos donde se ubican los sismómetros basándose en la probabilidad de ocurrencia de sismos en el área y en el grado de desastres que hayan causado, y finalmente se emite una alerta en las zonas donde la onda pueda causar daños graves. Este modelo fue implementado al norte de Japón a mediados de los años 50's. [10].

1.2. Método de detección de Onda S

Con un sismómetro o acelerómetro convencional se puede implementar un sistema de alerta temprana que actúe con la onda S (método de detección de onda S), desde el momento que el sismómetro empieza a operar dentro del intervalo de la onda S hasta alcanzar el punto de mayor amplitud del movimiento sísmico.

Sin embargo, para que un sismo sea detectado en una etapa temprana del movimiento sísmico así como para incrementar el tiempo disponible de prevención, se debe detectar el movimiento sísmico en la etapa inicial de la onda P (método de detección de onda P).

1.3. Método de Detección de Onda P

Si un temblor puede ser detectado en el inicio del movimiento de la onda P, el tiempo disponible para la prevención puede incrementarse en comparación con el método convencional.

En el caso de la onda P el método de detección por el cual una alerta será emitida mientras el movimiento del sismo es de baja amplitud, es importante determinar si la onda P corresponde a un sismo fuerte o un sismo menor.

Este problema provoca que un sistema pueda emitir falsas alertas con sismos menores. Sin embargo, para evitar la emisión de alertas falsas, es necesario determinar las características destructivas de un temblor.⁶

Es necesario para el sistema de detección de la onda P, estar equipado con una función capaz de estimar varios factores sísmicos de un temblor en la porción inicial de la onda P [11].

C. Sistema Predictor para una Alerta Sísmica

Un Sistema Predictor para una Alerta Sísmica predice la *magnitud* de un sismo pero no la *ocurrencia* del sismo en sí. El sistema predictor consistirá en un modelo matemático que prediga la magnitud considerando algunos parámetros que se obtengan del análisis de la onda sísmica en desarrollo y tendrá la estructura básica de un Sistema de Alerta Sísmica, que debido a su forma de operación, permitirá calcular en los primeros segundos del arribo de un sismo, los parámetros para el modelo matemático.

El Sistema Predictor de Alerta Sísmica pretende mejorar el sistema de alerta sísmica que actualmente se tiene funcionando en la Ciudad de México.

1. Modelo Matemático del Predictor

En la realización del Modelo Matemático se utilizan métodos matemáticos que calculan una función empírica, que relaciona la magnitud final del sismo con parámetros que se pueden medir en los primeros segundos de la señal sísmica (ver fig. 4), por lo que se considerará el análisis de la onda P en este nuevo sistema, que

⁶ Los patrones de daños captados en varios sismos, indican que las características destructivas pueden ser determinadas basándose en su magnitud y en la distancia entre la estructura afectada y el epicentro

ayudará a aumentar el margen de tiempo para desarrollar actividades en la prevención durante un sismo. También se debe tomar en cuenta para el estudio, la selección y clasificación de los registros históricos para su análisis, considerando además las características de las estaciones de campo que los registraron.

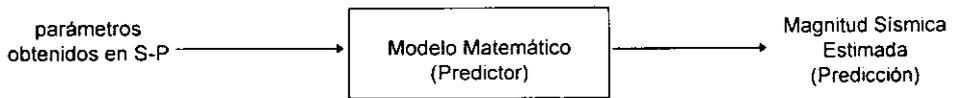


Fig. 4 Diagrama del Predictor

III. ANÁLISIS DE DATOS

Se presenta información concerniente a las estaciones de campo (ESDECAS) instaladas en la costa de Guerrero y que constituyen el arreglo de sensores del SAS. Los registros de las ESDECAS se usaron para el análisis, elaboración de gráficas y solución de ecuaciones que se presentan en este capítulo; se utilizó la herramienta matemática de cálculo MATLAB. Todos los registros empleados para el análisis fueron tomados de las ESDECAS y los datos de los eventos sísmicos fueron cotejados a partir de la información obtenida por el Sismológico Nacional del Instituto de Geofísica de la UNAM.

A. Registro Sísmico

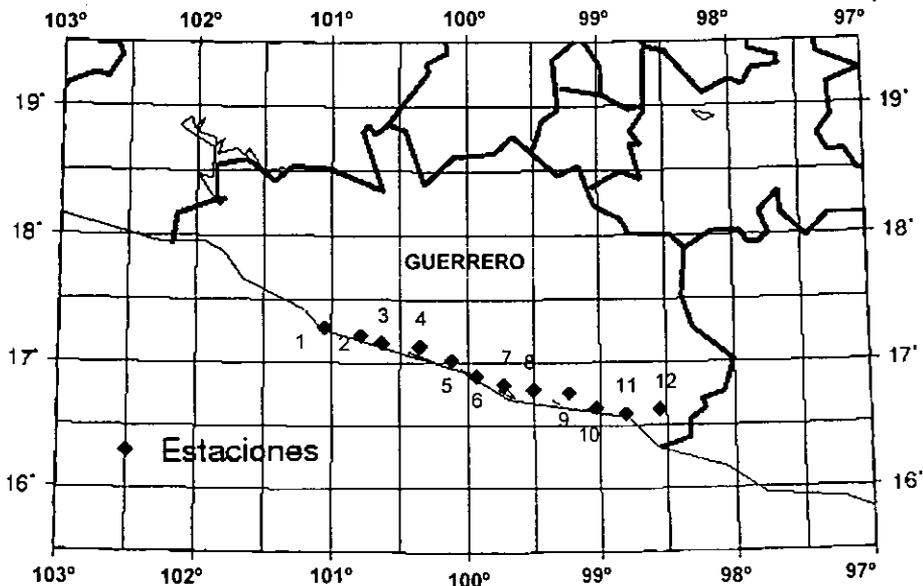
1. Estaciones de campo ESDECAS

El SAS cuenta con 12 estaciones acelerográficas de detección separadas entre sí aproximadamente 25 km., localizadas a lo largo de la costa de Guerrero. Cada estación cubre un radio máximo de detección menor de 100 km. En conjunto se

cubre un área de 200 km. de ancho y 450 km. de longitud. Los registros acelerográficos del SAS contienen 3 sensores de aceleración orientados en las direcciones norte-sur, este-oeste y vertical; un convertidor analógico digital, un controlador que determina si la señal analizada es un sismo de acuerdo con un algoritmo de detección, un radio transmisor y un sistema de alimentación apoyado en celdas solares y baterías. Los datos de los registros están tomados a 50 muestras por segundo [7].

El SAS obtiene los datos de una onda sísmica con la finalidad de alertar a la población. Debido al diseño del algoritmo de detección, en ocasiones no se registran completamente algunos eventos sísmicos y en el análisis se tuvieron algunos registros incompletos.

En la gráfica 1 se muestra la ubicación de las estaciones de campo del SAS.



Gráfica 1. Ubicación de las ESDECAS

Ubicación de las Estaciones

No. Estación	Nombre	Latitud N	Longitud W
1	Papanaoa	17° 17' 07"	101° 02' 28"
2	El Veinte	17° 13' 21"	100° 47' 20"
3	Tetitlán	17° 09' 42"	100° 37' 55"
4	Cacalutla	17° 07' 35"	100° 21' 00"
5	Pénjamo	17° 00' 50"	100° 06' 55"
6	El Jardín	16° 53' 31"	99° 57' 22"
7	San Pedro	17° 49' 39"	99° 44' 05"
8	El Cortés	16° 46' 40"	99° 30' 15"
9	Las Vigas	16° 45' 11"	99° 13' 47"
10	El Carrizo	16° 37' 55"	99° 01' 30"
11	Marquelia	16° 34' 15"	98° 49' 05"
12	Huehuetán	16° 37' 35"	98° 33' 32"

2. Criterio de Selección de Registros

Se consideraron varios criterios de selección con el fin de separar los registros que sirvieran para alcanzar el objetivo de la Tesis, dichos criterios fueron que:

- Tuvieran el inicio del evento sísmico.
- Se observara clara y en forma completa la onda P.
- Se observara el inicio de la onda S.
- No presentaran atenuación o amplitud de la señal, debido a efectos de sitio⁷.
- No presentaran truncamiento en la onda sísmica.

Una vez seleccionados los registros, se preprocesaron ya que debido a las características de las ESDECAS, de frecuencias propias de la onda sísmica y a efectos de sitio, los datos vienen modificados. El proceso de preparación consistió de tres etapas:

⁷ Las ondas sísmicas se ven afectadas por el tipo de suelo en donde viajan, provocando una amplificación o atenuación de las mismas. A este fenómeno se le conoce como efecto o factor de sitio

1. Inversión de polaridad. Los registros son guardados con formato especial y para la obtención de algunos parámetros, es necesario invertir la señal.

2. Filtrado. Considerando las ideas tomadas por K. R. Gledhill [8] , donde su algoritmo de detección emplea una etapa de filtrado de ruido adaptativo para minimizar los errores debido a los efectos de cambio de fase de la señal y los errores de redondeo numérico. El resultado de filtrado para cada evento sísmico es variable y los valores del filtro (en nuestro caso un filtro paso-banda) oscilan entre :

$$F_L = 0.1 \text{ Hz} - F_H = 8.5 \text{ Hz}$$

3. Promedio Móvil. Es común que en un sensor existan perturbaciones e incluso cambios abruptos en sus mediciones ajenas a la señal esperada, por lo que las muestras para el análisis se tomarán considerando cinco muestras registradas en promedio, es decir:

$$m(i) = (m_r(i) + m_r(i-1) + m_r(i-2) + m_r(i-3) + m_r(i-4)) * 1/5$$

donde:

$m(i)$ es la muestra i -ésima promediada para análisis.

m_r es la muestra registrada por la Estación.

Los registros seleccionados para obtener el modelo general de Predictor se muestran en la Tabla 1. Los datos de: Latitud, Longitud, Profundidad y Magnitud se tomaron con base en los reportes del Servicio Sismológico Nacional. Cabe mencionar que el dato de Magnitud sísmica **no tiene un patrón escalar fijo**, es decir, en ocasiones utiliza: M_w , M_c , M_s , etc.; por lo que los resultados que se generen deben siempre tomar en cuenta esta consideración.

Tabla 1. Archivos utilizados para el Predictor (General)

Estación	Archivo	Latitud	Longitud	Profundidad	Magnitud	Filtro Hz
Papanaoa	pa080597.tx1	17°16'	100°22'	14	5.1	0.5 - 3.5
"	pa211297.tx1	17°15'	100°54'	10	5.6	0.1 - 7.5
El Veinte	vn310393.tx	17°11'	101°01'	8	5.2	0.1 - 5.5
"	vn211297.tx1	17°15'	100°54'	10	5.6	0.1 - 8.5
Tetitlán	tt290793.tx	17°23'	100°40'	22	5.0	0.1 - 5.0
"	tt190796.txb	17°22'	100°18'	7	4.8	0.1 - 5.0
Cacalutla	cl290793.tx	17°23'	100°40'	22	5.0	0.1 - 5.5
Pénjamo	pe291094.tx1	16°58'	99°53'	24	5.1	0.1 - 5.5
EL Jardín	jr091192.tx4	16°44'	100°00'	21	4.8	0.1 - 7.0
San Pedro	sp041192.tx	16°43'	99°45'	7	4.3	0.1 - 5.5
"	sp241093.tx1	16°30'	99°00'	10	6.7	1.0 - 4.3
"	sp120794.tx	16°45'	99°55'	16	4.2	0.1 - 8.5
"	sp100994.tx2	16°46'	99°58'	20	4.0	0.1 - 5.5
"	sp291094.tx1	16°58'	99°53'	24	5.1	0.1 - 6.5
"	sp020195.tx	16°41'	99°46'	15	4.2	0.1 - 5.5
"	sp210397.tx1	17°02'	99°50'	27	4.8	0.1 - 6.0
"	sp110797.tx1	16°34'	99°39'	10	4.3	0.4 - 4.7
El Cortés	ct241093.tx1	16°30'	99°00'	10	6.7	0.1 - 8.5
Las Vigas	vg140593.tx1	16°26'	98°43'	20	5.8	0.1 - 8.5
"	vg140593.tx2	16°26'	98°43'	20	6.0	0.1 - 7.0
"	vg100993.tx	16°37'	99°05'	48	4.9	0.1 - 5.5
"	vg241093.tx1	16°30'	99°00'	10	6.7	0.1 - 8.0
"	vg270896.tx1	16°38'	99°25'	16	4.5	0.1 - 5.0
El Carrizo	cr140593.tx1	16°26'	98°43'	20	5.8	0.1 - 8.0
"	cr140593.tx2	16°26'	98°43'	20	6.0	0.5 - 8.0
"	cr100993.tx1	16°37'	99°05'	48	4.9	0.1 - 5.5
"	cr241093.tx1	16°30'	99°00'	10	6.7	0.1 - 5.5
"	cr140495.tx	16°26'	99°05'	25	4.8	0.1 - 5.5
"	cr140995.tx1	17°00'	99°00'	45	7.3	0.1 - 5.5
"	cr171096.tx1	16°32'	98°57'	10	4.9	0.1 - 5.5

B. Obtención de Parámetros

1. Tiempo S - P

Si pretendemos determinar parámetros considerando el Modelo de Detección de onda P, debemos encontrar el Tiempo S-P⁸. La técnica de detección de P y S utilizada está basada en la idea original propuesta por Nakamura [11], de que la onda P se manifiesta en forma predominante en su componente vertical V, y cuando arriba la onda S, se manifiesta en su componente horizontal H. Si la relación V/H es mayor a uno, ésta puede ser considerada como la onda P y si la relación V/H es menor a uno, puede ser considerada como la onda S. La expresión V y H quedan definidas en las ecuaciones (5) y (6).

$$V(i)^2 = \alpha V(i - 1)^2 + X_{ud}(i)^2 \quad (5)$$

$$H(i)^2 = \alpha H(i - 1)^2 + X_{ns}(i)^2 + X_{ew}(i)^2 \quad (6)$$

donde :

i es la i-ésima muestra de la onda sísmica $i=1,2,\dots$

X_{ud} es el canal vertical de la onda sísmica.

X_{ns} es el canal norte - sur de la onda sísmica.

X_{ew} es el canal este - oeste de la onda sísmica.

α es un factor de atenuación donde $0 \leq \alpha \leq 1$.

Después de hacer un análisis exhaustivo en los registros de sismos de Guerrero del SAS, aplicando el modelo de identificación de la onda P y S usado por Nakamura, (ecuaciones 5 y 6), el factor de atenuación α se eliminó ya que en el trabajo de análisis no presentaba un ajuste importante en los registros de la Costa

⁸ El tiempo S-P es como comúnmente los Sismólogos llaman al período de tiempo comprendido entre el inicio de la onda P y el inicio de la onda S, es decir, el período en donde podemos trabajar únicamente con la onda P

de Guerrero seleccionados. Otra modificación que se hizo en las Ecs. (5) y (6), consistió en sustituir la elevación al cuadrado de las muestras por el valor absoluto de éstas debido a valores muy pequeños en los registros⁹, y se considera para las componentes horizontales el promedio y no la suma de las componentes. El modelo para la detección de la onda P y de la onda S es:

$$V(i) = V(i - 1) + \text{abs}(X_{\text{ud}}(i)) \quad (7)$$

$$H(i) = H(i - 1) + 0.5 * (\text{abs}(X_{\text{ns}}(i)) + \text{abs}(X_{\text{ew}}(i))) \quad (8)$$

donde:

abs se entiende por valor absoluto.

Para las Ecs. (7) y (8) obtenidas se observa que de igual forma se contempla la relación V/H:

si $V/H > 1$, la onda P es predominante

si $V/H < 1$, la onda S es predominante

A continuación se muestra una gráfica de la estación No. 10 Las Vigas del sismo del 14 de mayo de 1993 de $M=6$ (figura 5).

⁹ Para una mayor identificación los registros del SAS presentan un offset en cada canal

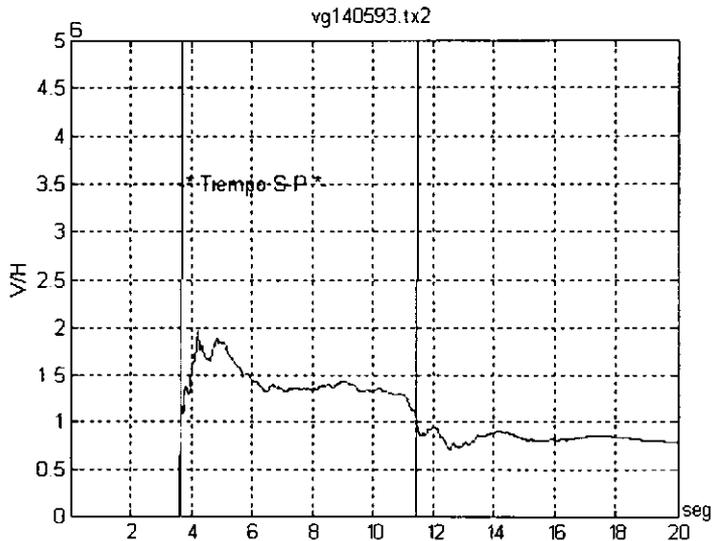


Fig. 5 Relación V/H para el tiempo S-P

El resultado de la detección de P y de S se puede apreciar en las gráficas de los canales: vertical, norte-sur y este-oeste del registro de la fecha señalada arriba (figuras 5.a, 5.b y 5.c respectivamente). En la Tabla A (que se encuentra al final de esta Tesis) se muestran los resultados de la obtención del Tiempo S-P para todos los registros empleados en el análisis.

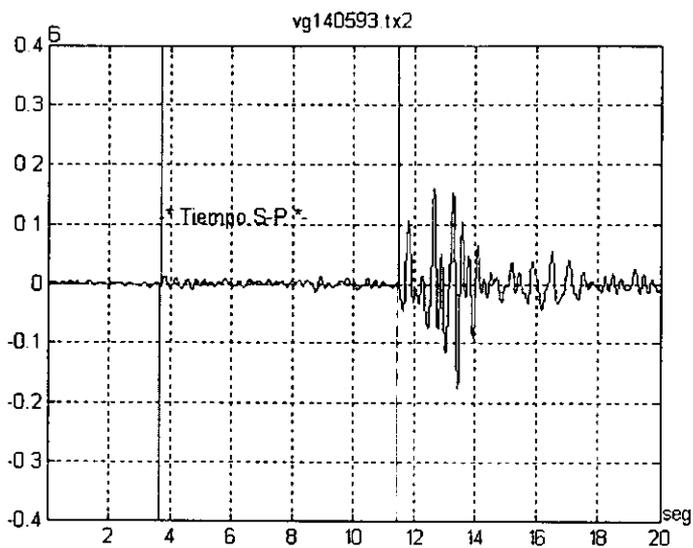


Fig. 5.a Resultado de S-P en canal vertical

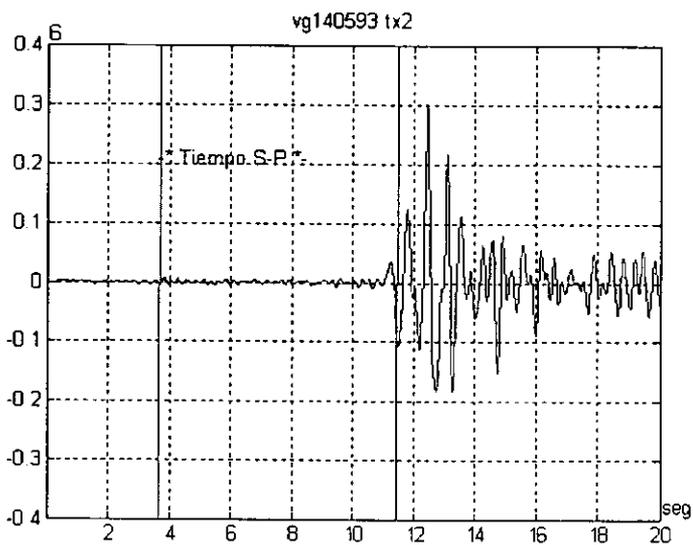


Fig. 5.b Resultado de S-P en canal norte-sur

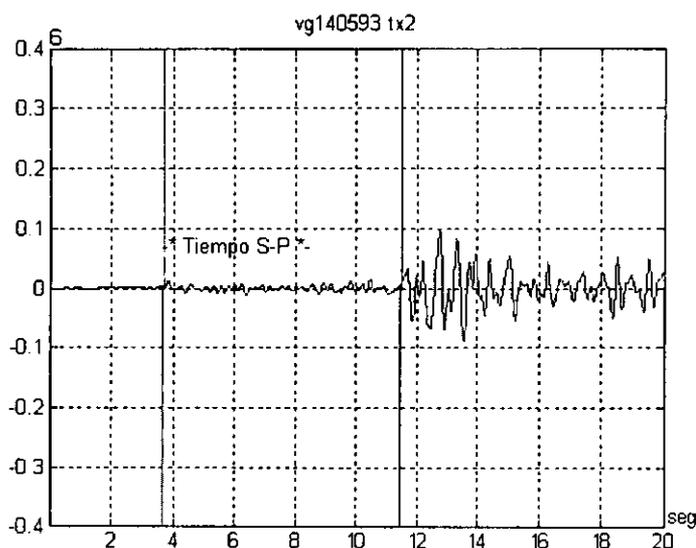


Fig. 5.c Resultado de S-P en canal este-oeste

2. Distancia Hipocentral

La distancia hipocentral proporciona la distancia del punto de medición al punto de falla, es decir, desde el epicentro¹⁰ a cierta profundidad hasta la localización de la estación que haya detectado el evento sísmico.

Partiendo del modelo propuesto en el UrEDAS por Nakamura [11], se sabe que los daños ocurridos en un sismo son proporcionales a la magnitud del sismo. La magnitud sísmica también presenta una relación proporcional a la distancia epicentral, en nuestro caso utilizamos el parámetro de la distancia hipocentral ya que su determinación es más sencilla y se puede cotejar en forma confiable con el Sismológico Nacional, (ver figura 6).

¹⁰ El epicentro es la localización geográfica superficial (latitud y longitud) donde se originó el evento sísmico.

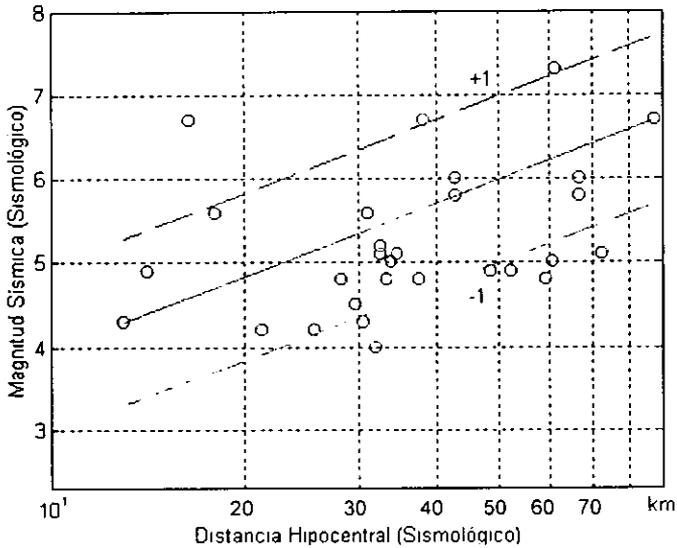


Fig. 6 Relación Distancia Hipocentral vs Magnitud

Como se observa, la distancia hipocentral presenta una relación logarítmica directamente proporcional a la magnitud, esta gráfica fue generada a partir de los registros sísmicos que se encuentran en la Tabla 1.

La distancia hipocentral es un parámetro que puede ser empleado para el Modelo Matemático (Predictor), y es calculado durante el tiempo S-P previamente obtenido.

2.1. Cálculo de la distancia hipocentral

A partir del tiempo S-P, se puede obtener la distancia hipocentral si se conoce la velocidad de la onda P. Es de considerarse que el cálculo de la velocidad varía en función del tipo de suelo por el que se propaga la onda, por lo que la velocidad que comúnmente se emplea es la promedio. En este trabajo hemos propuesto para la obtención de la velocidad promedio un sistema de ecuaciones en base a un conjunto de registros que permitan encontrar dicho parámetro.

2.2. Cálculo de la velocidad promedio V_p

A partir de considerar un sistema de n - ecuaciones (n registros) con una incógnita, V_p , podemos dar una estimación preliminar considerando dos parámetros perfectamente medibles: el tiempo S-P y la distancia hipocentral¹¹.

El tiempo S-P se obtiene a partir del número de muestras, para su conversión a segundos se multiplica por un factor de 1/50, debido al muestreo de 50 muestras/seg.

A partir de la distancia hipocentral y del tiempo S-P obtenidos de cada registro, se calculó una velocidad promedio V_p considerando lo siguiente:

$$d_{H1} = V_p * t_{s-p1}$$

$$d_{H2} = V_p * t_{s-p2}$$

$$\vdots$$

$$d_{Hn} = V_p * t_{s-pn}$$

¹¹ La distancia hipocentral se obtuvo a partir de el epicentro y la profundidad proporcionadas por el Sismológico Nacional.

donde:

d_H es la distancia hipocentral dada por el Sismológico Nacional.

V_p es la Velocidad promedio.

t_{s-p} es el tiempo S-P obtenido.

De lo anterior se obtiene la siguiente ecuación en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} d_{H1} \\ d_{H2} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ d_{Hn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{s-p1} \\ t_{s-p2} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ t_{s-pn} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_p \end{bmatrix}$$

Si expresamos la matriz de elementos d_H como D y la matriz de elementos t_{s-p} como T, se obtiene la expresión:

$$D = T * V_p \quad (9)$$

Despejando V_p se obtiene:

$$V_p = (T^T * T)^{-1} T^T D \quad (10)$$

donde:

-1 es la operación matricial inversa.

T^T es la matriz transpuesta de T.

El resultado obtenido de V_p es el valor de velocidad promedio. La distancia que se obtenga es un valor promedio ya que para su cálculo consideramos la siguiente expresión:

$$D_H = V_p \cdot t \quad (11)$$

donde:

D_H es la distancia hipocentral promedio.

V_p es la velocidad promedio de la onda P.

t es el tiempo S-P.

En la figura 7 se muestran los resultados obtenidos por este método. Los datos para el cálculo fueron tomados de la Tabla 1. En la Tabla A se muestran todos los resultados generados a partir de los registros seleccionados.

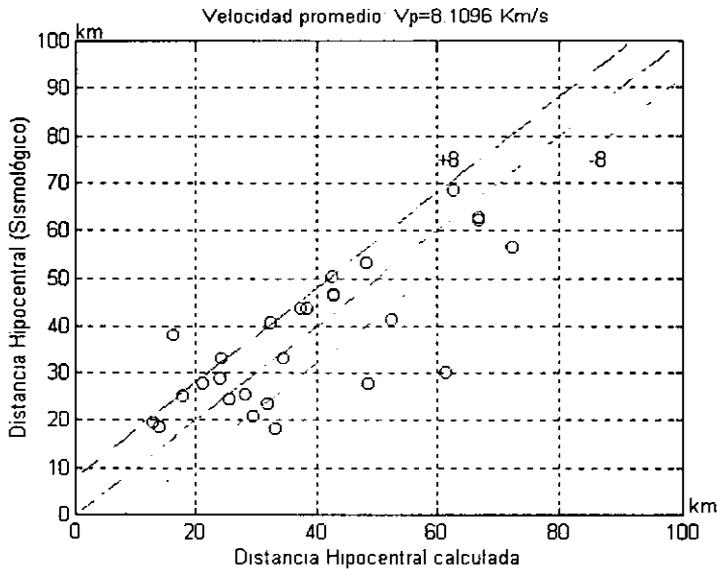


Fig. 7 Comparación de la Distancia Hipocentral Calculada vs Sismológico

3. Aceleración Máxima

Un tercer parámetro a considerar es la aceleración, se sabe, partiendo de los datos obtenidos por el Sismológico Nacional y el CIRES, que la aceleración generalmente es directamente proporcional a la magnitud sísmica, es decir, a medida que la aceleración aumenta la magnitud sísmica también aumenta, lo anterior lo podemos apreciar en la siguiente gráfica (figura 8).

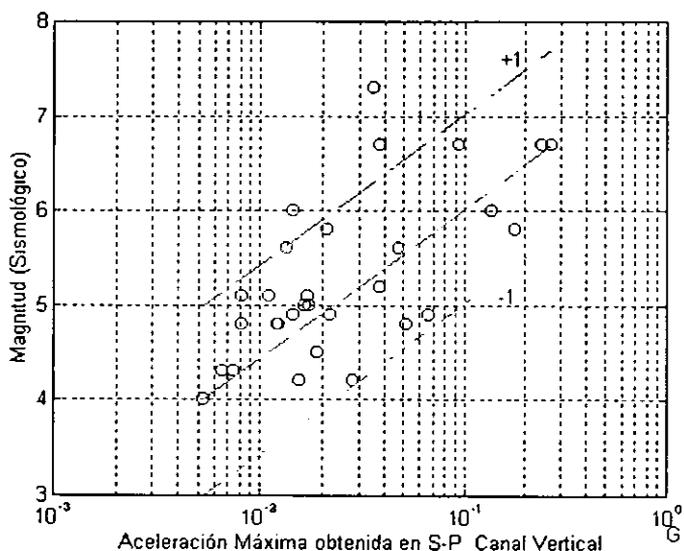


Fig. 8 Relación de Aceleración Máxima vs Magnitud

De la gráfica arriba mostrada se desprende que la Aceleración Máxima en el tiempo S-P presenta una relación logarítmica, directamente proporcional a la magnitud sísmica; los archivos empleados en esta gráfica se muestran en la Tabla 1.

Las aceleraciones durante el tiempo S-P de los tres canales: vertical, norte-sur y este-oeste se comportan de la misma forma en relación a la Magnitud (relación proporcional), pero como sabemos que durante el arribo de la onda P la componente

vertical predomina utilizaremos ésta para el modelo, en la Tabla A se muestran las aceleraciones máximas para los tres canales.

4. Frecuencia Dominante

Al inspeccionar visualmente un sismograma, la forma que comúnmente emplean los sismólogos para obtener la frecuencia dominante de un sismo es contar los cruces por cero, es por ello, que hemos tomado este método por su sencillez en la obtención de la frecuencia dominante en los registros empleados.

En la ocurrencia de un sismo con gran magnitud, el periodo de oscilación de la onda será largo, en caso contrario donde la magnitud de un sismo sea pequeña, dicho periodo tendrá una oscilación corta, es por ello que la frecuencia del mismo será inversamente proporcional a la magnitud de dicho sismo. Esta relación ya ha sido comprobada en otros trabajos como el realizado por J. Anderson-Roberto Quaas¹² quienes observaron a través del análisis de registros del sismo de 19 de septiembre del 1985 en México, que a bajas frecuencias las magnitudes de sismos fuertes eran registrados, mientras que los sismos menores sólo alcanzaban a ser registrados en altas frecuencias [13]. Lo anterior, puede observarse en la figura 9.

¹²R. QUAAS-J. ANDERSON. "Characteristics of earthquakes in the mexican subduction zone on strong motion accelerograms" *Revista de Ingeniería Sísmica*. Sep-Dec, 1996, No.54.

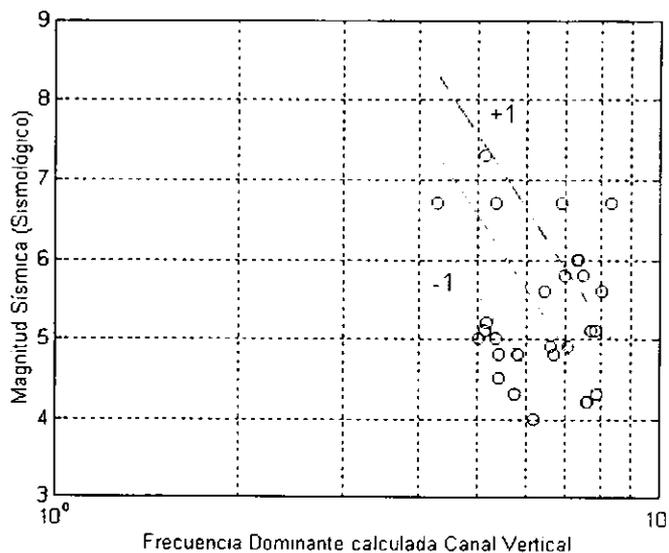


Fig. 9 Relación de Frecuencia Dominante vs Magnitud

Se observa que la frecuencia dominante en el tiempo S-P es inversamente proporcional a la magnitud. Los registros utilizados se muestran en la Tabla 1.

Como para la obtención de la aceleración se tomó la componente vertical para el modelo, se tomará de igual forma la frecuencia dominante de la componente vertical con la idea de homogeneizar los parámetros. En la Tabla A se muestran las frecuencias dominantes de las tres componentes de los registros utilizados.

IV. DETERMINACIÓN DE PREDICTOR

A. Desarrollo del Modelo Matemático Predictor

Como hemos observado los parámetros analizados: distancia hipocentral, aceleración máxima y frecuencia dominante, muestran una relación directamente proporcional en los dos primeros parámetros e inversamente proporcional en el último parámetro, con respecto a la magnitud, por lo que se propone el siguiente modelo:

$$M = a^{\alpha} dh^{\beta} fd^{\chi} \quad (12)$$

donde.

a es la aceleración máxima en el intervalo S-P.

dh es la distancia hipocentral.

fd es la frecuencia dominante en S-P.

M es la magnitud sísmica proporcionada por el Sismológico Nacional.

α, β, χ son constantes de ajuste.

Aplicando el \log_{10} a la ecuación (12):

$$\log_{10}M = \log_{10}(a'' \cdot dh^{\beta} \cdot fd^{\chi}) \quad (13)$$

por las propiedades de los logaritmos:

$$\log_{10}M = \alpha \cdot \log_{10}(a) + \beta \cdot \log_{10}(dh) + \chi \cdot \log_{10}(fd) \quad (14)$$

La ecuación (14) es un modelo que presenta características de linealidad a la que se pretende llegar; las constantes: α , β , χ son los valores desconocidos. Si introducimos al modelo n -sismos registrados por el SAS, en los cuales se conozcan los parámetros: M , a , dh y fd , entonces se tendría un sistema de n ecuaciones con sólo tres incógnitas, dicho sistema sería linealmente independiente.

Así podríamos encontrar las condiciones del modelo para el cálculo de una Magnitud estimada (M_e) en base al conocimiento de la Magnitud dada por el Sismológico (M). Esta forma de obtener el modelo, también es empleada por Yi-Ben Tsai¹³ y Yih-Min Wu para sismos en Taiwan [14].

B. Cálculo de las constantes de Ajuste

Considerando la ecuación (9), para cada evento sísmico tendríamos la siguiente expresión:

$$\log_{10}M_1 = \alpha \cdot \log_{10}(a_1) + \beta \cdot \log_{10}(dh_1) + \chi \cdot \log_{10}(fd_1)$$

$$\log_{10}M_2 = \alpha \cdot \log_{10}(a_2) + \beta \cdot \log_{10}(dh_2) + \chi \cdot \log_{10}(fd_2)$$

$$\begin{matrix} \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \end{matrix}$$

$$\log_{10}M_n = \alpha \cdot \log_{10}(a_n) + \beta \cdot \log_{10}(dh_n) + \chi \cdot \log_{10}(fd_n)$$

¹³ El modelo matemático empleado en Taiwan tiene la siguiente forma $M = \alpha \log_{10} X + K1$, donde X es el impulso inicial de la onda sísmica y $K1$ es una constante para ajustar el modelo

expresando el sistema de ecuaciones anterior en forma matricial:

$$\begin{array}{c} \left[\begin{array}{c} \log_{10}M_1 \\ \log_{10}M_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \log_{10}M_n \end{array} \right] \\ \text{Y} \end{array} = \begin{array}{c} \left[\begin{array}{ccc} \log_{10}(a_1) & \log_{10}(dh_1) & \log_{10}(fd_1) \\ \log_{10}(a_2) & \log_{10}(dh_2) & \log_{10}(fd_2) \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \log_{10}(a_n) & \log_{10}(dh_n) & \log_{10}(fd_n) \end{array} \right] \\ \text{A} \end{array} * \begin{array}{c} \left[\begin{array}{c} \alpha \\ \beta \\ \chi \end{array} \right] \\ \text{X} \end{array}$$

el vector de parámetros óptimo es:

$$Y = A * X \quad (15)$$

donde:

Y es la matriz de magnitudes.

A es la matriz producto de los logaritmos de las aceleraciones, distancias hipocentrales y frecuencias dominantes.

X es la matriz de constantes de ajuste.

Encontrando los valores para las constantes de atenuación utilizando mínimos cuadrados y aplicando álgebra matricial:

$$X = (Y * A^T)^{-1} * A^T \quad (16)$$

donde:

A^T es la transpuesta de A y el subíndice -1 es la inversa de una matriz.

La ecuación (16) genera los valores para las constantes: α , β , χ , que permitirán calcular una nueva magnitud estimada (M_e) con respecto a la magnitud proporcionada por el Sismológico Nacional (M).

Finalmente los valores obtenidos considerando los registros de la Tabla 1 son:

$$\alpha = 0.0351$$

$$\beta = 0.2228$$

$$\chi = -0.4975$$

La figura 10 muestra la gráfica que compara la Magnitud Estimada vs la Magnitud del Sismológico

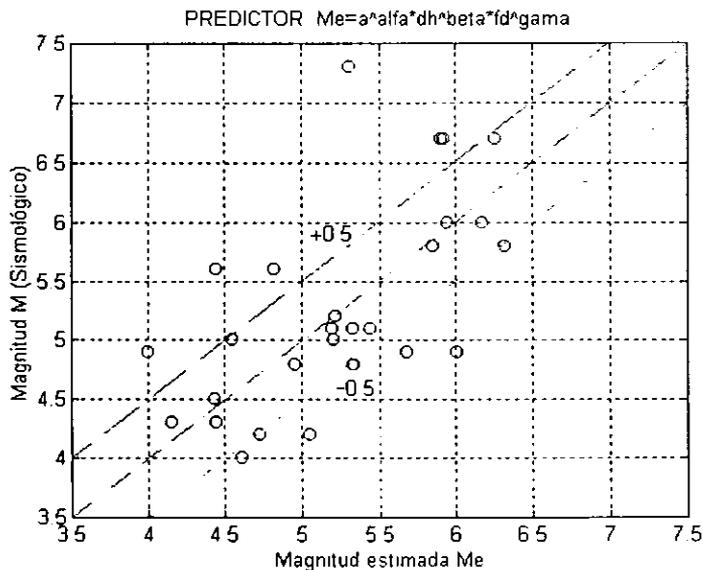


Fig. 10 Resultado de la Magnitud estimada utilizando el Modelo Predictor vs Magnitud del Sismológico

C. Error promedio del Predictor

El error promedio obtenido es:

$$E_p\% = \left[\sum_{i=1}^n \text{abs}(M_i - M_{e_i}) * 100 / M_i \right] / n \quad (17)$$

donde:

n es el número total de sismos utilizados.

M_i es la i -ésima magnitud dada por el sismológico.

M_{e_i} es la i -ésima magnitud generada por el Predictor.

el resultado obtenido fue:

$$E_p = 8.0304\%$$

La estimación porcentual del Predictor con respecto a la Magnitud del Sismológico Nacional la podemos expresar como:

$$\text{Estimación}\% = 100 - E_p$$

Entonces:

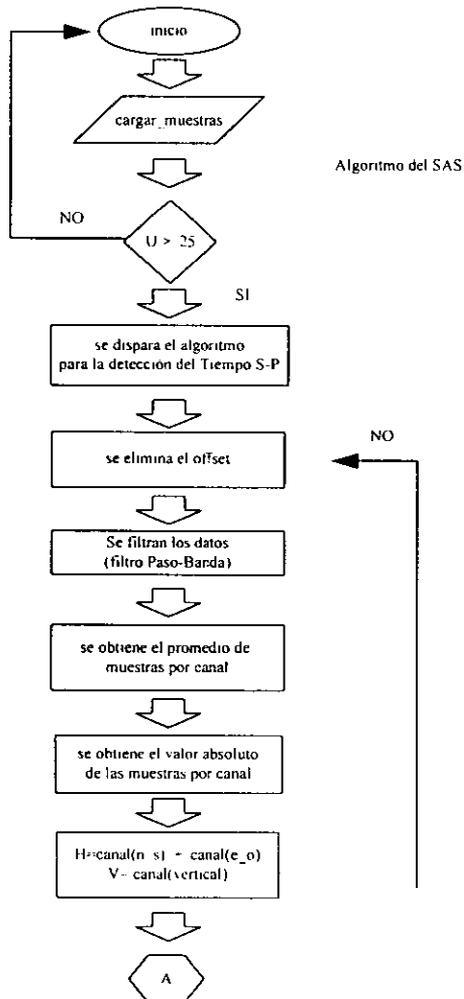
$$\text{Estimación} = 91.9696\%$$

V. DIAGRAMAS DE FLUJO

Se presentan los diagramas de flujo que describen el Sistema Predictor, dichos diagramas se dividen en dos partes: Diagrama de flujo para la obtención de parámetros provenientes de las estaciones de campo localizadas en la costa de Guerrero, y el segundo, es el Diagrama de flujo que describe el proceso para realizar la predicción de magnitud sísmica de los valores de los parámetros provenientes de Guerrero.

A. Diagrama de flujo para la obtención de parámetros

El diagrama 1 presenta el desarrollo del proceso de obtención de los siguientes parámetros: aceleración, distancia hipocentral y frecuencia dominante.



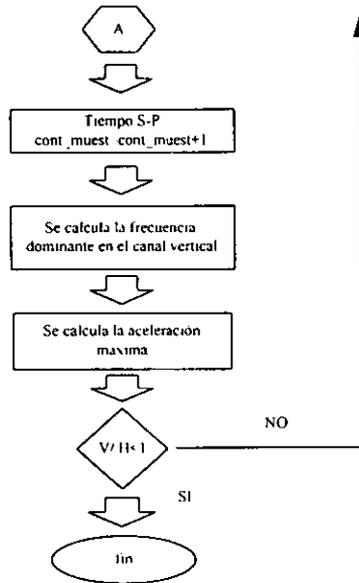


Diagrama 1. Obtención de parámetros

B. Diagrama de flujo para el Predictor

El diagrama 2 muestra el proceso de obtención de la magnitud estimada por el Modelo Predictor.

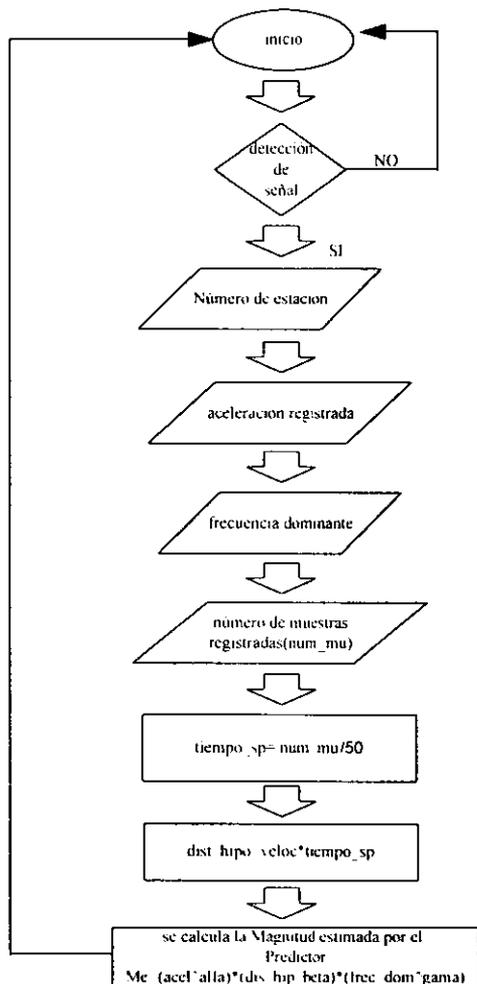


Diagrama 2 Obtención de magnitud por el Modelo Predictor

VI. PRUEBAS

A. Comparación Inicial

Como se ha visto, el predictor general que toma datos de más de 20 sismos, se acerca a la Magnitud calculada por el Sismológico Nacional. En la Tabla 2 se muestra la comparación de los resultados obtenidos por el algoritmo que actualmente opera en el SAS, contra el modelo predictor general obtenido.

Tabla 2. Resultados de magnitud obtenidos por el algoritmo actual del SAS y el Modelo Predictor.

Archivo	Magnitud Sismológico	Resolvió Algoritmo (SAS)	Aciertos	Resolvió PREDICTOR		Aciertos
pa080597.tx1	5.1	Evento		5.3264	M < 6	✓
pa211297.tx1	5.6	M > 6		4.8186	M < 5	
vn310393.tx	5.2	M < 6	✓	5.2164	M < 6	✓
vn211297.tx1	5.6	M < 6	✓	4.4426	M < 5	
tt290793.tx	5.0	M < 5		4.5506	M < 5	
tt190796.txb	4.8	M < 5	✓	4.9593	M < 5	✓
cl290793.tx	5.0	Evento		5.2041	M < 6	✓
pe291094.tx1	5.1	M < 6	✓	5.4398	M < 6	✓
jr091192.tx4	4.8	M > 6		4.3311	M < 5	✓

Archivo	Magnitud Sismológico	Resolvió Algoritmo (SAS)	Aciertos	Resolvió PREDICTOR		Aciertos
sp041192.tx	4.3	M < 5	✓	4.1504	M < 5	✓
sp241093.tx1	6.7	M > 6	✓	5.9324	M < 6	
sp120794.tx	4.2	M < 5	✓	5.0462	M < 6	
sp100994.tx2	4.0	M < 5	✓	4.6112	M < 5	✓
sp291094.tx1	5.1	M < 6	✓	5.1885	M < 6	✓
sp020195.tx	4.2	M < 5	✓	4.7295	M < 5	✓
sp210397.tx1	4.8	Evento	✓	5.3419	M < 6	
sp110797.tx1	4.3	M < 5	✓	4.4411	M < 5	✓
ct241093.tx1	6.7	M < 6		5.9146	M < 6	
vg140593.tx1	5.8	M < 6	✓	6.3247	M > 6	
vg140593.tx2	6.0	M < 6		6.1810	M > 6	✓
vg100993.tx	4.9	M < 6		6.0125	M > 6	
vg241093.tx1	6.7	Evento		6.2663	M > 6	✓
vg270896.tx1	4.5	M < 6		4.4374	M < 5	✓
cr140593.tx1	5.8	Evento		5.8587	M < 6	✓
cr140593.tx2	6.0	M < 6		5.9556	M < 6	
cr100993.tx1	4.9	M < 6		5.6817	M < 6	
cr241093.tx1	6.7	M > 6	✓	3.7310	M < 5	
cr140495.tx	4.8	M < 6		4.9528	M < 5	✓
cr140995.tx1	7.3	M > 6	✓	5.3086	M < 6	
cr171096.tx1	4.9	M < 6		3.9972	M < 5	✓
Total			15			17

El modelo predictor aumentó el número de aciertos en comparación al algoritmo del SAS. Quizá la diferencia no es muy grande, pero se debe a que se tomaron las siguientes consideraciones:

1. Por cada registro se utilizó una frecuencia individual de filtrado (ver Tabla A).
2. El Predictor realizó el ajuste en sus constantes α , β , γ considerando todas las estaciones en conjunto, sin atender las características particulares de cada estación.
3. Para el parámetro de distancia hipocentral, no se atendió las características particulares de cada estación.
4. No se le dio importancia al acierto de sismos con magnitudes $M \geq 6$.

Las consideraciones anteriores permiten ver que para el Predictor no se debe obtener un modelo general que se utilice en todas las ESDECAS, ya que cada una de ellas presenta características propias que afectarían a todo el conjunto. Por lo que se deben generar tantos predictores como ESDECAS se tengan y generar su modelo para el cálculo de distancia hipocentral por ESDECA. Por otro lado, considerando el punto 4, las constantes de ajuste: α , β , χ , de los Predictores que se generen, deben estimar un valor de Magnitud muy próximo a sismos con magnitudes $M \geq 6$. Las estaciones que se emplearon para realizar un análisis particular son:

- Estación No. 7 San Pedro.
- Estación No. 9 Las Vigas.
- Estación No. 10 El Carrizo.

Estas estaciones se eligieron por ser las que contaban con más de 3 registros con las características indicadas anteriormente (lo mínimo para poder obtener un Predictor).

B. Cálculo de Predictores

Considerando las características propias de cada estación, podemos ajustar un Predictor por cada una de ellas, para lo cual consideraremos un filtro representativo, así como una velocidad promedio por estación para que cada estación presente un modelo individual. A continuación se presentan los cálculos de cada estación con sus parámetros y los modelos de cada estación con el predictor obtenido, comparándolo con los valores de Magnitud obtenidos por el Algoritmo que actualmente emplea el SAS.

1. San Pedro

El criterio para fijar el filtro promedio fue considerando el filtro más representativo, es decir el que se presentaba con mayor frecuencia entre los registros para San Pedro procurando que los sismos de $M > 6$ se ajustaran a éste. Para San Pedro el filtro promedio fue:

$$F_L = 0.15 \text{ Hz} - F_H = 6.5 \text{ Hz}$$

1.1. Distancia Hipocentral

El cálculo de la distancia promedio se ajustó modificando el parámetro de V_p (velocidad promedio) en este caso involucrando únicamente datos de la Estación de San Pedro. El resultado de la velocidad promedio es:

$$V_p = 7.5253$$

En la figura 11.a se muestra la gráfica de la Distancia Hipocentral para la estación San Pedro considerando el nuevo valor V_p .

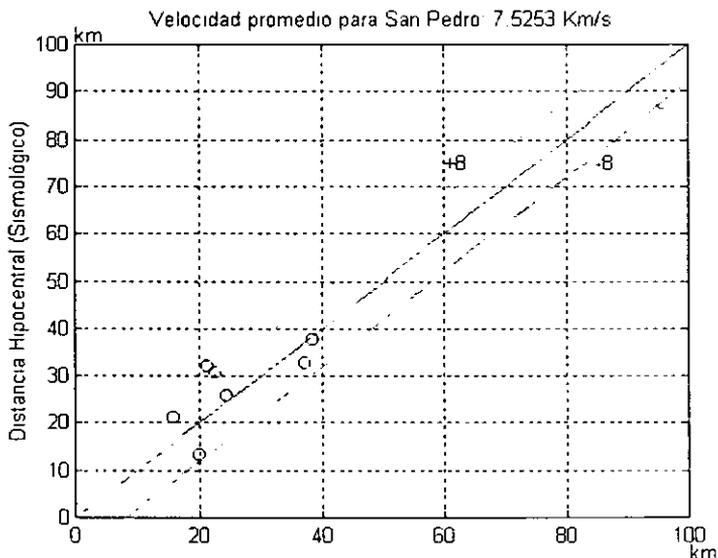


Fig. 11.a Distancia Hipocentral obtenida

1.2. Predictor para San Pedro

Los parámetros de ajuste: α , β , χ , se vieron afectados por la modificación de la frecuencia promedio y la distancia hipocentral. Los valores para los parámetros de ajuste para San Pedro son:

$$\alpha = 0.0169$$

$$\beta = 0.2544$$

$$\chi = -0.2914$$

La figura 11.b muestra la gráfica que compara la Magnitud Estimada con el ajuste para la estación San Pedro vs la Magnitud del Sismológico. En la Tabla B (que se encuentra al final de la Tesis) se muestran los nuevos valores obtenidos.

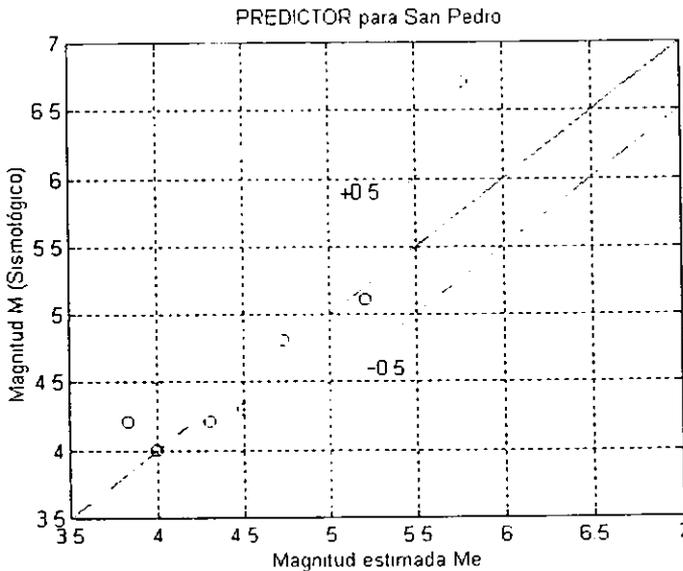


Fig. 11 b Resultado de la Magnitud estimada utilizando el Modelo Predictor vs Magnitud del Sismológico

2. Las Vigas

El criterio para fijar el filtro promedio fue considerando el filtro más representativo, es decir el que se presentaba con mayor frecuencia entre los registros para Las Vigas procurando que los sismos de $M > 6$ se ajustaran a éste. Para Las Vigas el filtro promedio es:

$$F_L = 0.15 \text{ Hz} - F_H = 7.0 \text{ Hz}$$

2.1. Distancia Hipocentral

El cálculo de la distancia promedio se ajustó modificando el parámetro de V_p (velocidad promedio) en este caso involucrando únicamente datos de la Estación Las Vigas. El resultado de la velocidad promedio es:

$$V_p = 8.7733$$

En la figura 12.a se muestra la gráfica de la Distancia Hipocentral para la estación Las Vigas considerando el nuevo valor V_p .

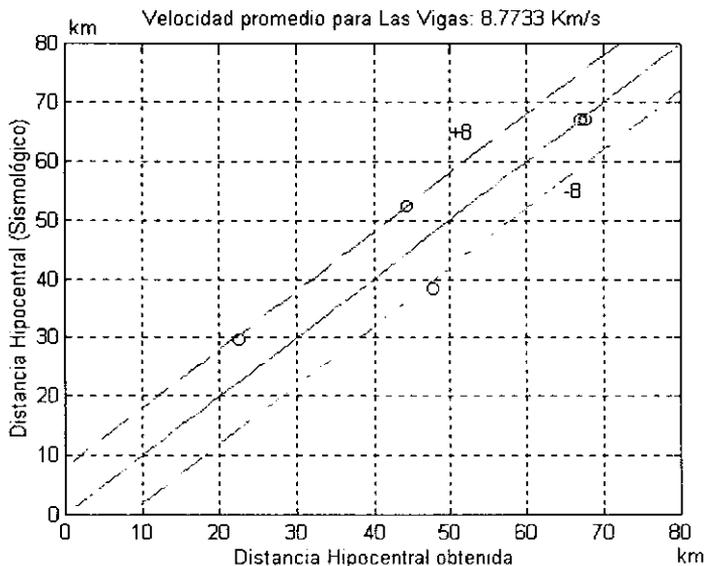


Fig. 12.a Relación de la Distancia Hipocentral obtenida vs Sismológico

2.2. Predictor para Las Vigas

Los parámetros de ajuste: α , β , χ , se vieron afectados por la modificación de la frecuencia promedio y la distancia hipocentral. Los valores para los parámetros de ajuste para Las Vigas son:

$$\alpha = 0.0738$$

$$\beta = 0.3848$$

$$\chi = -0.2288$$

La figura 12.b muestra la gráfica que compara la Magnitud Estimada con el ajuste para la estación Las Vigas vs la Magnitud del Sismológico. En la Tabla B se muestran los nuevos valores obtenidos.

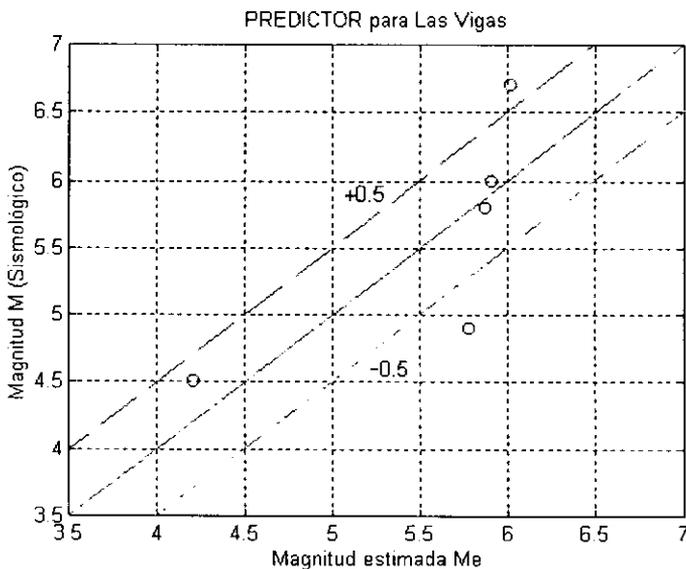


Fig. 12.b Resultado de la Magnitud estimada utilizando el Modelo Predictor vs Magnitud del Sismológico

3. El Carrizo

El criterio para fijar el filtro promedio fue considerando el filtro más representativo, es decir el que se presentaba con mayor frecuencia entre los registros para El Carrizo procurando que los sismos de $M > 6$ se ajustaran a éste. Para El Carrizo el filtro promedio es:

$$F_L = 0.1 \text{ Hz} - F_H = 5.5 \text{ Hz}$$

3.1. Distancia Hipocentral

El cálculo de la distancia promedio se ajustó modificando el parámetro de V_p (velocidad promedio) en este caso involucrando únicamente datos de la Estación El Carrizo. El resultado de la velocidad promedio es:

$$V_p = 8.2284$$

En la figura 13.a se muestra la gráfica de la Distancia Hipocentral para la estación El Carrizo considerando el nuevo valor V_p .

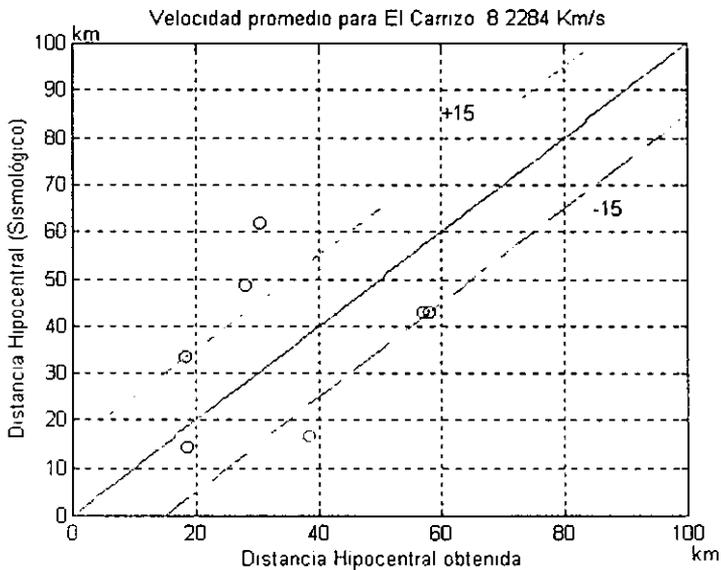


Fig. 13.a Relación Distancia Hipocentral obtenida vs Sismológico

3.2. Predictor para El Carrizo

Los parámetros de ajuste: α , β , χ , se vieron afectados por la modificación de la frecuencia promedio y la distancia hipocentral. Los valores para los parámetros de ajuste para El Carrizo son:

$$\alpha = -0.2763$$

$$\beta = 0.6283$$

$$\chi = 0.7556$$

La figura 13.b muestra la gráfica que compara la Magnitud Estimada con el ajuste para la estación El Carrizo vs la Magnitud del Sismológico. En la Tabla B se muestran los nuevos valores obtenidos.

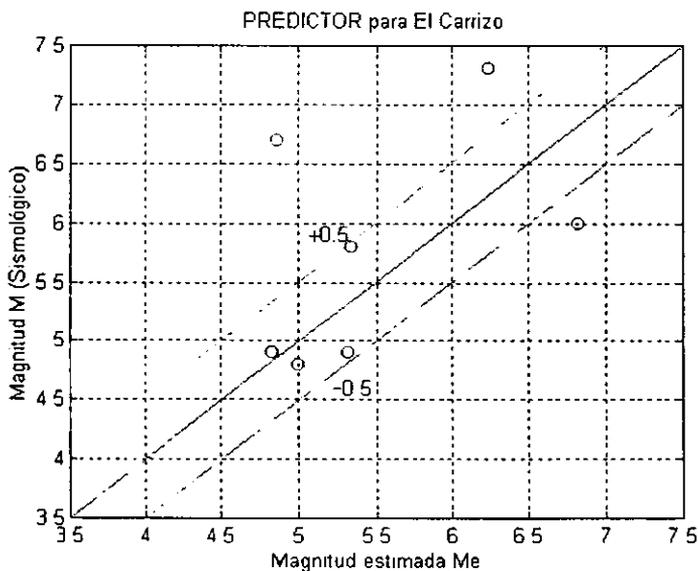


Fig. 13.b Resultado de la Magnitud estimada utilizando el Modelo Predictor vs Magnitud del Sismológico

C. Comparación Final

Tabla 3. Resultados de magnitud obtenidos por el algoritmo actual del SAS y el Modelo Predictor.

Archivo	Magnitud Sismológico	Resolvió Algoritmo (SAS)	Aciertos	Resolvió PREDICTOR	Aciertos
sp041192.tx	4.3	M < 5	✓	4.5010 M < 5	✓
sp241093.tx1	6.7	M > 6	✓	5.7769 M < 6	
sp120794.tx	4.2	M < 5	✓	4.3096 M < 5	✓
sp100994.tx2	4.0	M < 5	✓	4.0008 M < 5	✓
sp291094.tx1	5.1	M < 6	✓	5.2086 M < 6	✓
sp020195.tx	4.2	M < 5	✓	3.8368 M < 5	✓
sp210397.tx1	4.8	Evento	✓	4.7393 M < 5	✓
sp110797.tx1	4.3	M < 5	✓	4.6706 M < 5	✓
vg140593.tx1	5.8	M < 6	✓	5.8773 M < 6	✓
vg140593.tx2	6.0	M < 6		5.9085 M < 6	
vg100993.tx	4.9	M < 6		5.7820 M < 6	
vg241093.tx1	6.7	Evento		6.0224 M > 6	✓
vg270896.tx1	4.5	M < 6		4.2119 M < 5	✓
cr140593.tx1	5.8	Evento		5.3409 M < 6	✓
cr140593.tx2	6.0	M < 6		6.8222 M > 6	✓
cr100993.tx1	4.9	M < 6		5.3118 M < 6	
cr241093.tx1	6.7	M > 6	✓	4.8646 M < 5	
cr140495.tx	4.8	M < 6		4.9998 M < 5	✓
cr140995.tx1	7.3	M > 6	✓	6.2394 M > 6	✓
cr171096.tx1	4.9	M < 6		4.8275 M < 5	✓
Total			11		15

Cálculo del error promedio final:

$$E_p = 7.8352\%$$

La estimación porcentual con respecto a la Magnitud del Sismológico Nacional es:

$$\text{Estimación} = 92.1648\%$$

VII.RESULTADOS

La detección del tiempo S-P en base a la relación V/H (considerando las ecuaciones 5 y 6), permitió analizar el inicio de la onda P y algunos segundos después, y a partir de este análisis se obtuvieron los parámetros: distancia hipocentral, aceleración máxima y frecuencia dominante, para el modelo predictor de magnitud en los primeros segundos del arribo de un sismo (ver figuras 5, 5.a, 5.b, 5.c).

El parámetro de distancia hipocentral cumple en general con una relación directamente proporcional con respecto a la Magnitud sísmica (ver figura 6), y se observa que su cálculo usando el valor de velocidad promedio (V_p) a partir del sistema de ecuaciones propuesto (ecuaciones 7 y 8), junto con los valores obtenidos del tiempo S-P en los registros utilizados, se aproxima al valor de la distancia hipocentral proporcionada por el Sismológico Nacional (ver figura 7); incluso evaluando V_p para cada estación (ver figuras 11.a, 12.a, 13.a).

Al igual que la distancia hipocentral, el parámetro de aceleración máxima presentó en general una relación directamente proporcional con respecto a la Magnitud sísmica (ver figura 8).

El parámetro de frecuencia dominante presentó en general una relación inversamente proporcional con respecto a la Magnitud sísmica (ver figura 9).

Una vez que se obtienen los parámetros: aceleración máxima, distancia hipocentral y frecuencia dominante en el tiempo S-P, es decir, unos instantes después que la onda S inicia, se envían los valores obtenidos de dichos parámetros para el cálculo de Magnitud utilizando el Modelo Predictor.

Los Predictores considerados para cada estación (Estaciones San Pedro, Las Vigas y El Carrizo) dieron en conjunto una estimación promedio mayor de 92% (acertando su estimación en sismos de $M \geq 6$) con respecto a la Magnitud del Sismológico (ver Tabla 3); a diferencia del Predictor General (ver Tabla 2) cuya estimación promedio resultó ser mayor a 91% aunque sin acertar en sismos importantes de $M \geq 6$.

Finalmente, se observa que los resultados cumplen en forma satisfactoria con el objetivo propuesto, el cual contemplaba un modelo que obtuviera información en los primeros segundos de arribo de un sismo para realizar una predicción de magnitud sísmica.

VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Las modificaciones realizadas en las expresiones matemáticas propuestas por Nakamura [11] para la obtención del tiempo S-P, permitieron dar una estimación aceptable en los registros de las estaciones del Sistema de Alerta Sísmica.

Los parámetros: distancia hipocentral, aceleración máxima y frecuencia dominante involucrados en la obtención del Predictor fueron determinantes y representativos de la señal sísmica, puesto que las gráficas obtenidas de cada uno de ellos (figuras 7, 8 y 9) mostraron la relación que se esperaba con respecto a la magnitud sísmica. Sin embargo, no se elimina la posibilidad de considerar otros parámetros representativos de la señal sísmica como son: la frecuencia de esquina, el factor RMS, la energía acumulativa, etc.

El proceso de obtención de las muestras promedio por canal, el cual elimina cambios abruptos de la señal y disminuye en gran medida el ruido, da una mejor precisión de la señal que se está trabajando, aunque el número de muestras necesarias para el promedio puede ser modificado (por ejemplo 10, 16, etc.).

El obtener un sistema Predictor por estación, considerando para el Predictor un filtro promedio por cada estación utilizada, contribuyó a mejorar el porcentaje de

estimación resultante del modelo Predictor, así como el aumento de aciertos en la determinación de la magnitud sísmica y particularmente en sismos de $M \geq 6$ sin descuidar aquellos sismos de $M < 5$ para evitar falsas alertas (ver Tablas 2 y 3).

Los resultados del Sistema Predictor para los registros utilizados en todo el desarrollo en comparación con los resultados obtenidos por el Algoritmo del SAS, dan un mayor número de aciertos (ver Tablas 2 y 3), y la estimación de Magnitud del Predictor con respecto a la Magnitud proporcionada por el Sismológico Nacional dan resultados con un rango mínimo de error menor de 8%.

CONCLUSIONES

La solución en forma matricial de sistemas de ecuaciones utilizados para la obtención de la velocidad promedio V_p (parámetro para el cálculo de la distancia hipocentral) y las constantes de ajuste para el Modelo Predictor: α , β , χ ; permitieron en una forma sencilla y rápida dar un modelo Predictor de estimación de Magnitud Sísmica con un rango de error menor de 8%, tomando para dicho cálculo únicamente los primeros segundos en el arribo de un sismo.

Los parámetros obtenidos en el intervalo S-P de un sismo: distancia hipocentral, aceleración máxima y frecuencia dominante, fueron representativos de la señal sísmica, permitiendo ajustar en el modelo Predictor una eficiente predicción de Magnitud.

El considerar un sistema Predictor y un filtro promedio por cada estación, permitió contemplar algunos factores externos e internos propios de cada estación mejorando con ello la precisión del modelo Predictor.

Los criterios utilizados e involucrados en este trabajo, junto con los parámetros empleados, constataron su importancia representativa sobre el estudio de las señales sísmicas; y en base a los resultados obtenidos, el Sistema Predictor para una Alerta Sísmica es una alternativa para ser utilizada en sismos provenientes de la Brecha de Guerrero.

REFERENCIAS

- [1] ANDERSON, John, *et al.* "The Guerrero Accelerograph Network", Geofísica Internacional, Vol. 33, Num. 3, 1994.
- [2] ALARCÓN, Adolfo. "Comunicado de Prensa acerca del sismo de Colombia", e-mail: rsnc@esmeralda.ingecomín.gov.co, (INGEOMINAS), Colombia, 25 de enero de 1999.
- [3] BELES, Aurel, *et al.* Elementos de Ingeniería Sísmica, Barcelona, Omega, 1975, p. 42.
- [4] BOLAÑOS, Fernando. "Análisis de Ondas Sísmicas", Mundo electrónico, México, No. 136, 1984.
- [5] BOLT, Bruce A. Earthquakes A Primer, San Francisco, W. H. Freeman and Company, 1976.
- [6] CRUZ -REINA, Servando. Ciencias de la Tierra Hoy, México, Universidad Nacional Autónoma de México -Fondo de Cultura Económica, 1994 p. 63-65.
- [7] ESPINOSA-ARANDA, J. M. *et al.* "Mexico City Seismic Alert System", Seismological Research Letter, Vol. 66, Num. 6 November-December, 1995.
- [8] GLEDHILL, K. R. "An Earthquake detector employing frequency domain techniques", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 78, No. 6, December 1985.
- [9] JIMÉNEZ, Alejandro, *et al.* "Análisis de Confiabilidad del Sistema de Alerta Sísmica", Memoria del X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, México, Puerto Vallarta, Jalisco, 1993.

- [10] NAKAMURA, Yutaka and Yasuhisa Bito. "Urgent Earthquake Detection and Alarm System", Japan Society of Civil Engineers, Japan.
- [11] NAKAMURA, Yutaka. "Real-Time Information systems for Seismic Hazards Mitigation UrEDAS, HERAS and PIC", Quarterly Report of RTRI, Vol. 37, No. 3, November 1996.
- [12] NAVA, Alejandro. Terremotos, F.C.E. - Conacyt - S.E.P., colección:La Ciencia Para Todos, México, 1988.
- [13] R. QUAAS - J. ANDERSON. "Characteristics of earthquakes in the mexican subduction zone on strong motion accelerograms". Revista de Ingeniería Sísmica. Septiembre-Diciembre, 1996, No.54.
- [14] YI - BEN Tsai. "Quick Determination of Magnitude and Intensity for Seismic Early Warning", National Central University, Central Weather Bureau, Taiwan.

TABLA A

En la primera columna se muestran los archivos de los registros de las estaciones de campo (ESDECAS) instaladas en las costas de Guerrero proporcionado por el SAS.

Las siguientes cuatro columnas muestran información de: Latitud, Longitud, Profundidad y Magnitud proporcionada por el Sismológico Nacional.

Las columnas restantes muestran los resultados de: Distancia epicentral (Ds_e), el Inicio (inic), Fin (fin) y Duración del tiempo S-P (T_sp), el Filtro utilizado por cada registro, la Distancia Hipocentral (Dst_hipo), la frecuencia dominante de: el canal Vertical (Fd_v), Norte-Sur (Fd_ns) y Este-Oeste (Fd_eo), aceleración máxima de el canal Vertical (Ac_v), Norte-Sur (Ac_n-s) y Este-Oeste (Ac_e-o).

Archivo	Latitud	Longitud	Prof	Magn	Ds_e	inic	fin	T_sp	Filtro.Hz	Dst_hipo	Fd_v	Fd_ns	Fd_eo	Ac_v	Ac_n-s	Ac_e-o
Estación No. 1 "Papanoa"																
pa080597.in1	17°16'	100°22'	14	5.1	71	164	510	347	0.5 - 3.5	72.3671	5.1402	4.6729	5.2960	0.0110	0.0135	0.0187
pa211297.in1	17°15'	100°54'	10	5.6	15	202	356	155	0.1 - 7.5	18.0278	8.0645	8.3871	9.3548	0.0473	0.1279	0.0588
Estación No. 2 "El Veinte"																
vn310393.in	17°11'	101°01'	8	5.2	23	203	405	203	0.1 - 5.5	24.3516	5.1724	6.4039	7.6355	0.0384	0.0631	0.0732
vn211297.in1	17°15'	100°54'	10	5.6	22	189	365	177	0.1 - 8.5	24.1661	6.4746	9.6045	6.4972	0.0136	0.0176	0.0287
Estación No. 3 "Tetitlán"																
tt290793.ix	17°23'	100°40'	22	5.0	24	203	453	251	0.1 - 5.0	32.5576	5.3705	4.1833	5.3785	0.0172	0.0504	0.0389
tt190796.ixb	17°22'	100°18'	7	4.8	42	203	511	309	0.1 - 5.0	42.5793	5.8258	5.5016	4.5307	0.0082	0.0184	0.0137
Estación No. 4 "Cacalutla"																
cl290793.in	17°23'	100°40'	22	5.0	43	100	427	328	0.1 - 5.5	48.3011	5.0305	5.3354	6.5549	0.0165	0.0268	0.0691
Estación No. 5 "Pénjamo"																
pc291094.in1	16°58'	99°53'	24	5.1	25	205	407	203	0.1 - 5.5	34.6554	7.8818	8.6207	6.8966	0.0169	0.0269	0.0658
Estación No. 6 "El Jardín"																
jr0911192.ix4	16°44'	100°0'	21	4.8	19	189	344	156	0.1 - 7.0	28.3196	5.4487	8.6538	5.7692	0.0122	0.0313	0.0275
Estación No. 7 "San Pedro"																
sp041192.in	16°43'	99°45'	7	4.3	11	199	318	120	0.1 - 5.5	13.0384	7.9167	5.0000	6.2500	0.0075	0.0073	0.0036
sp241093.in1	16°30'	99°00'	10	6.7	87	200	712	513	1.0 - 4.3	87.5728	5.3666	7.6023	5.5556	0.0384	0.0272	0.0694
sp120794.in	16°45'	99°55'	16	4.2	20	200	350	151	0.1 - 8.5	25.6125	7.6159	9.2715	6.6225	0.0283	0.0105	0.0223
sp100994.in2	16°46'	99°58'	20	4.0	25	182	326	145	0.1 - 5.5	32.0156	6.2039	5.5172	7.5862	0.0053	0.0107	0.0171
sp291094.in1	16°58'	99°53'	24	5.1	22	180	430	251	0.1 - 6.5	32.5576	7.7381	8.3333	8.9286	0.0082	0.0062	0.0092
sp020195.in	16°41'	99°46'	15	4.2	15	199	368	170	0.1 - 5.5	21.2152	7.6471	6.1765	4.1176	0.0156	0.0128	0.0122
sp210397.in1	17°02'	99°50'	27	4.8	26	203	471	269	0.1 - 6.0	37.4833	6.6914	8.7361	7.9926	0.0516	0.0424	0.0432
sp110797.in1	16°34'	99°39'	10	4.3	29	202	340	139	0.4 - 4.7	30.6757	5.7554	4.6763	6.4748	0.0066	0.0078	0.0169

**ESTA TESTS NO DEBE
SARIR DE LA BIELITECA**

TABLA B

La tabla muestra los resultados de los registros de las tres estaciones que se utilizaron para considerar un modelo Predictor por estación tomando en cuenta un filtro promedio para cada una de ellas.

En la columna uno se muestra el nombre de los registros del SAS.

Las siguientes cuatro columnas muestran información de los eventos sísmicos de los registros proporcionada por el Sismológico Nacional.

Las siguientes columnas: Distancia epicentral (Ds_e), Inicio (inic), Fin (fin) y duración del tiempo S-P (T_{sp}), la frecuencia dominante del canal vertical (Fd_v) y la aceleración máxima del canal vertical (Ac_v), son resultados finales.

Archivo	Latitud	Longitud	Prof	Magn	Ds_e	inic	fin	T_{sp}	Fd_v	Ac_v
---------	---------	----------	------	------	--------	------	-----	----------	--------	--------

Estación No. 7 "San Pedro"

Filtro: $F_L=0.15 - F_H=6.5$

sp041192.tx	16°43'	99°45'	7	4.3	11	199	331	133	9.7744	0.0102
sp241093.tx1	16°30'	99°00'	10	6.7	87	200	835	636	6.9182	0.412
sp120794.tx	16°45'	99°55'	16	4.2	20	200	363	163	7.3620	0.0215
sp100994.tx2	16°46'	99°58'	20	4.0	25	182	323	142	5.9859	0.0062
sp291094.tx1	16°58'	99°53'	24	5.1	22	180	425	246	9.3496	8.0088
sp020195.tx	16°41'	99°46'	15	4.2	15	199	303	105	7.1429	0.0165
sp210397.tx1	17°02'	99°50'	27	4.8	26	203	457	255	7.2549	0.0507
sp110797.tx1	16°34'	99°39'	10	4.3	29	202	341	150	10.333	0.0181

Estación No. 9 "Las Vigas"

Filtro: $F_L=0.15 - F_H=7.0$

vg140593.tx1	16°26'	98°43'	20	5.8	64	162	547	386	6.4767	0.0232
vg140593.tx2	16°26'	98°43'	20	6.0	64	190	572	383	7.8329	0.0144
vg100993.tx	16°37'	99°05'	48	4.9	21	195	447	253	8.1028	0.0839
vg241093.tx1	16°30'	99°00'	10	6.7	37	196	467	273	6.440	0.2432
vg270896.tx1	16°38'	99°25'	16	4.5	25	198	326	129	9.3023	0.0250

Estación No. 10 "El Carrizo"

Filtro: $F_L=0.1 - F_H=5.5$

cr140593.tx1	16°26'	98°43'	20	5.8	38	198	545	348	6.1782	0.1590
cr140593.tx2	16°26'	98°43'	20	6.0	38	200	553	254	4.6610	0.1473
cr100993.tx1	16°37'	99°05'	48	4.9	7	213	382	170	7.0588	0.0220
cr241093.tx1	16°30'	99°00'	10	6.7	13	201	433	233	4.2918	0.2425
cr140495.tx	16°26'	99°05'	25	4.8	22	198	309	112	6.6964	0.0123
cr140995.tx1	17°00'	99°00'	45	7.3	42	190	374	185	5.1351	0.0357
cr171096.tx1	16°32'	98°57'	10	4.9	10	192	304	115	6.6372	0.0146

Archivo	Latitud	Longitud	Prof	Magn	Ds_e	inic	fin	T_sp	Filtro Hz	Dst_hipo	Fd_v	Fd_ns	Fd_eo	Ac_v	Ac_n-s	Ac_e-o
Estación No. 8 "El Cortés"																
ct241093.tx1	16°30'	99°00'	10	6.7	62	187	608	422	0.1 - 8.5	62.8013	6.8884	9.8575	8.9070	0.0939	0.2750	0.2669
Estación No. 9 "Las Vigas"																
vg140593.tx1	16°26'	98°43'	20	5.8	64	162	548	387	0.1 - 8.5	67.0522	7.4935	7.8811	7.3643	0.0211	0.0845	0.0245
vg140593.tx2	16°26'	98°43'	20	6.0	64	190	572	383	0.1 - 7.0	67.0522	7.3107	8.2245	7.5718	0.0146	0.0884	0.0178
vg100993.tx1	16°37'	99°05'	48	4.9	21	195	448	254	0.1 - 5.5	52.3927	7.0866	7.6772	7.6772	0.0661	0.2488	0.0351
vg241093.tx1	16°30'	99°00'	10	6.7	37	196	464	269	0.1 - 8.0	38.3275	8.3643	7.9926	6.8773	0.2707	0.5422	0.1804
vg270896.tx1	16°38'	99°25'	16	4.5	25	198	326	129	0.1 - 5.0	29.6816	5.4264	4.2636	4.6512	0.0190	0.0616	0.0610
Estación No. 10 "El Carrizo"																
cr140593.tx1	16°26'	98°43'	20	5.8	38	198	484	287	0.1 - 8.0	42.9418	6.9686	7.4913	7.3171	0.1776	0.3057	0.2254
cr140593.tx2	16°26'	98°43'	20	6.0	38	200	484	285	0.5 - 8.0	42.9418	7.3684	8.2456	8.5965	0.1353	0.1352	0.1432
cr100993.tx1	16°37'	99°05'	48	4.9	7	213	382	170	0.1 - 5.5	48.5077	7.0588	8.5294	6.7647	0.0220	0.0327	0.0317
ct241093.tx1	16°30'	99°00'	10	6.7	13	201	433	233	0.1 - 5.5	16.4012	4.2918	6.2232	4.7210	0.2425	0.6540	0.6775
cr140495.tx1	16°26'	99°05'	25	4.8	22	198	309	112	0.1 - 5.5	33.3017	6.6964	6.2500	5.3571	0.0123	0.0433	0.0333
cr140995.tx1	17°00'	99°00'	45	7.3	42	190	374	185	0.1 - 5.5	61.5549	5.1351	4.8649	4.0541	0.0357	0.1489	0.0617
cr171096.tx1	16°32'	98°57'	10	4.9	10	192	304	113	0.1 - 5.5	14.1421	6.6372	5.7522	5.7522	0.0146	0.0341	0.0335