



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

INSTITUTO DE INGENIERÍA

**UN MÉTODO ALTERNO PARA ESTIMAR LA DURACIÓN  
DE LA FASE INTENSA DEL MOVIMIENTO SÍSMICO**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE

**INGENIERO CIVIL**

P R E S E N T A

**JORGE ALBERTO SILVÁN CÁRDENAS**

TUTOR:

**M. en I. Leonardo Alcántara Nolasco**



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.

---

# UN MÉTODO ALTERNO PARA ESTIMAR LA DURACIÓN DE LA FASE INTENSA DEL MOVIMIENTO SÍSMICO

Introducción	1
I. Red Acelerográfica en la ciudad de Oaxaca	
<i>I.1 Localización de las estaciones</i>	12
<i>I.2 Proceso constructivo</i>	16
<i>I.3 Registros obtenidos</i>	20
II. Duración de la fase intensa del movimiento sísmico	
<i>II.1 Antecedentes</i>	26
<i>II.2 Métodos de cálculo</i>	27
III. Método alterno neuronal	
<i>III.1 Redes Neuronales Artificiales</i>	30
<i>III.2 Modelo neuronal propuesto</i>	40
IV. Resultados y Análisis	46
Conclusiones	59
Referencias	61

## INTRODUCCIÓN

La litosfera es la capa más superficial de la corteza terrestre, es rígida y está compuesta por material que puede fracturarse, al ejercer fuerza sobre él, para formar un rompecabezas llamado placas tectónicas, estas viajan como bloques de corcho en agua sobre la astenósfera, la cual es una capa visco-elástica donde el material fluye. Los desplazamientos de las placas son debidos a movimientos de convección, esto es, el material caliente del interior de la tierra sube a la superficie liberando calor interno, mientras que el frío baja. En los límites entre placas, donde hacen contacto unas con otras, se generan fuerzas de fricción que mantienen atoradas a dos adyacentes, produciendo grandes esfuerzos en los materiales. Cuando dichos esfuerzos sobrepasan la resistencia de la roca, o cuando se vence la fuerza de fricción, se produce la ruptura violenta y la liberación repentina de la energía acumulada, de la cual una parte se irradia en forma de ondas que se propagan en todas direcciones a través del medio sólido de la tierra. En la figura 1 se muestran los lugares donde emerge y subduce el material arrastrado en la convección junto a las características de temperatura y profundidad.

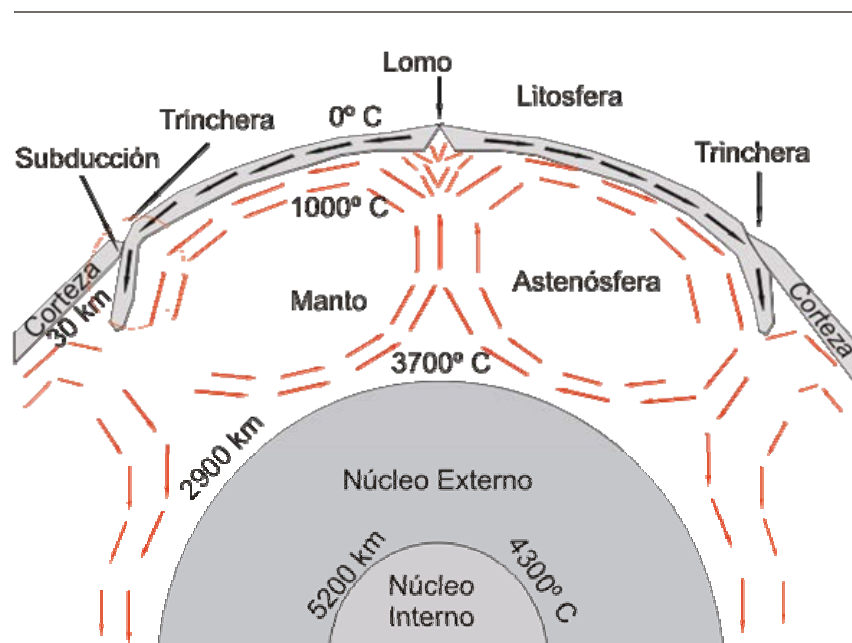


Figura 1 Corrientes de convección en la astenósfera que generan la tectónica de placas (ref. 1)

Cuando ocurre el rompimiento de las rocas en el interior de la tierra y la liberación de energía, se provoca un movimiento el cual conocemos como sismo.

La litosfera no es continua sobre la superficie de la tierra, pues está formado por diferentes placas que al hacer contacto unas con otras sufren movimientos relativos, esto solo es posible si en algunos de los márgenes se está creando nueva litosfera mientras que en otros se están encimando, proceso al que se conoce como subducción. Debido a estos movimientos los continentes han variado su posición relativa a través del tiempo geológico y se cree que en un tiempo estuvieron todos reunidos en un gran continente llamado Pangea, situación explicada con la teoría de la deriva continental. Un ejemplo de lo anterior es el ajuste que se puede observar entre las costas de Sudamérica y África. La figura 2 presenta esquemáticamente la evolución de las placas continentales desde el pérmico hasta nuestros días.

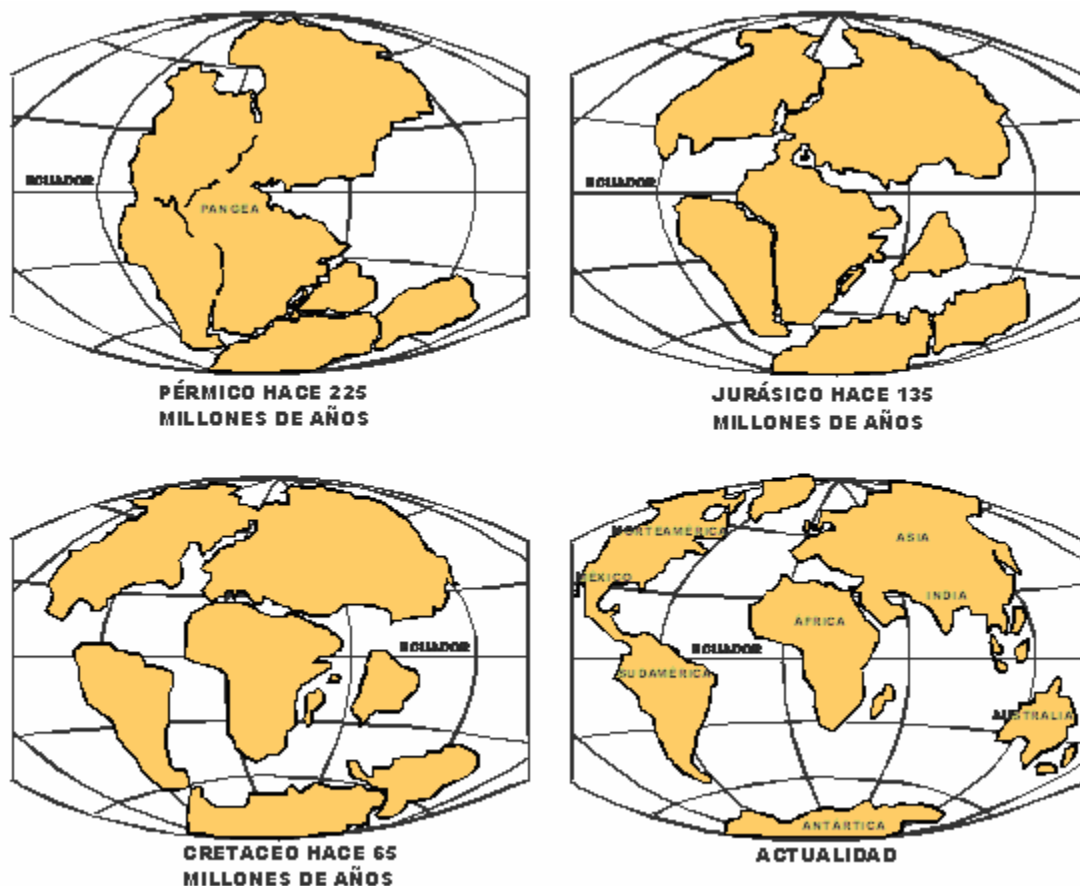


Figura 2 Teoría de la deriva continental (ref. 2)

La figura 3 muestra la distribución geográfica de las placas tectónicas en el planeta, en las flechas contrapuestas se genera litosfera y se conoce como divergencia, en las encontradas existe subducción o convergencia, y en las paralelas el movimiento es lateral o transcurrente. Las zonas de creación de nueva litosfera presentan cordilleras submarinas y las de subducción forman a menudo trincheras de gran profundidad. Es notable que las diferentes placas no coinciden con los continentes y los océanos, sino que pueden tener corteza continental u oceánica.

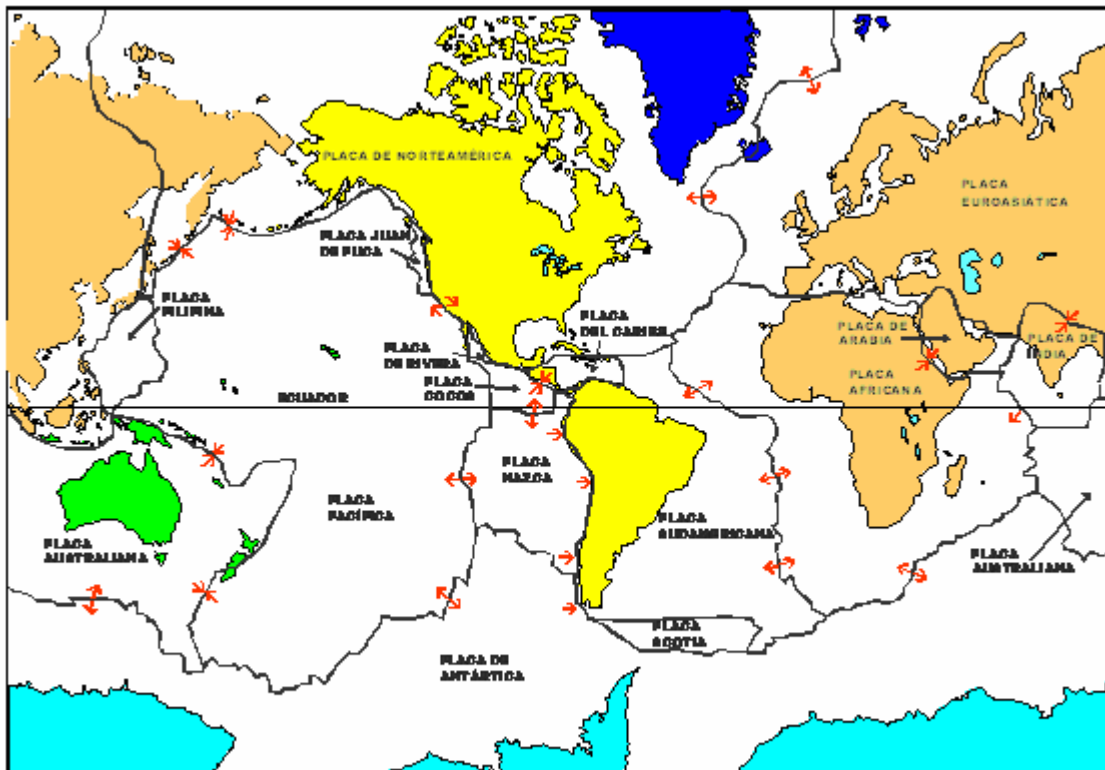


Figura 3 Ubicación de placas tectónicas existentes en el planeta (ref. 3)

El territorio Mexicano se encuentra localizado entre cinco placas tectónicas, sin embargo la mayor parte se ubica sobre la Norteamericana, que también contiene partes del océano Atlántico y Asia. La península de Baja California, así como California y el océano Pacífico están sobre la placa del Pacífico. El sur de Chiapas, las islas Caribeñas y los países de Centroamérica se hallan en la del Caribe. Las otras dos placas que conforman el rompecabezas tectónico de México son las de Cocos y Rivera.

La placa Norteamericana se separa de la del Pacífico, roza con la del Caribe y choca contra las de Rivera y Cocos. La interacción entre estas grandes placas produce la gran mayoría de los sismos en México. En la figura 4 se muestra la ubicación y se indica la dirección de su movimiento.

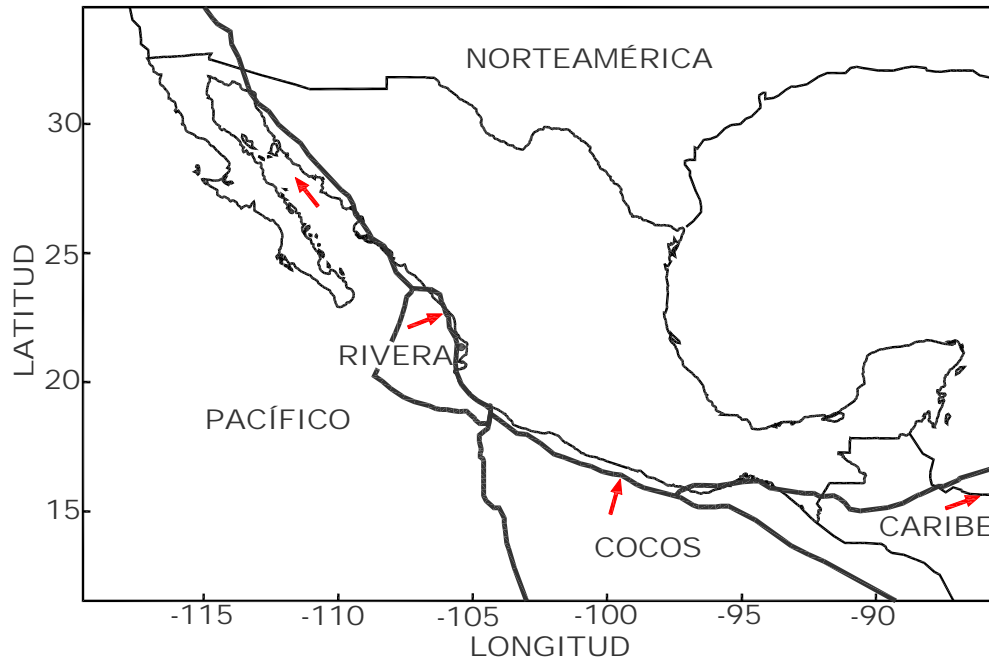


Figura 4 Ubicación y movimiento de las placas en la República Mexicana (ref. 4)

Por otra parte, el tamaño de un sismo es una función de la región que sufre resquebrajamiento, entre mayor sea el área que se rompe por la acción de las fuerzas tectónicas, mayor es el tamaño del temblor. Como la mayor área de contacto entre placas se encuentra en las zonas de subducción, es aquí donde ocurren los sismos más grandes, no solo en México, sino también en el mundo. En la costa del Pacífico, desde Puerto Vallarta en el estado de Jalisco hasta Tapachula en Chiapas, se han producido los más grandes sismos Mexicanos. La longitud de ruptura de las fallas ha variado de unos 50 hasta 200 kilómetros de largo. Estos temblores inter-placa ocurren por el mencionado roce de la placas Norteamericana con las oceánicas de Cocos y Rivera.

En la figura 5 se describe brevemente la localización y el tipo de falla de los sismos más importantes ocurridos en México. Los sismos profundos se producen por el resquebrajamiento de las placas oceánicas de Rivera y de Cocos, ocurren a

profundidades mayores a los 40 kilómetros, y se muestran con estrellas rojas. En el caso de los denominados corticales estos se generan dentro de la placa Norteamericana, normalmente son muy superficiales y no llegan a rebasar los 35 kilómetros de profundidad, estos se muestran con estrellas azules. Por otra parte, están los conocidos como de subducción, que ocurren a lo largo de la costa del Pacífico. Estos eventos han llegado a alcanzar grandes magnitudes como lo fue el caso del sismo del 19 de septiembre de 1985 ( $M=8.1$ ). Existen también otros sismos producidos por el rozamiento entre las placas Norteamericana y Pacífico, el caso más típico es el de la zona de la falla de San Andrés al noreste del país. De igual manera los que ocurren en zonas de fractura oceánica, bajo el fondo del mar, muy alejados de las costas.

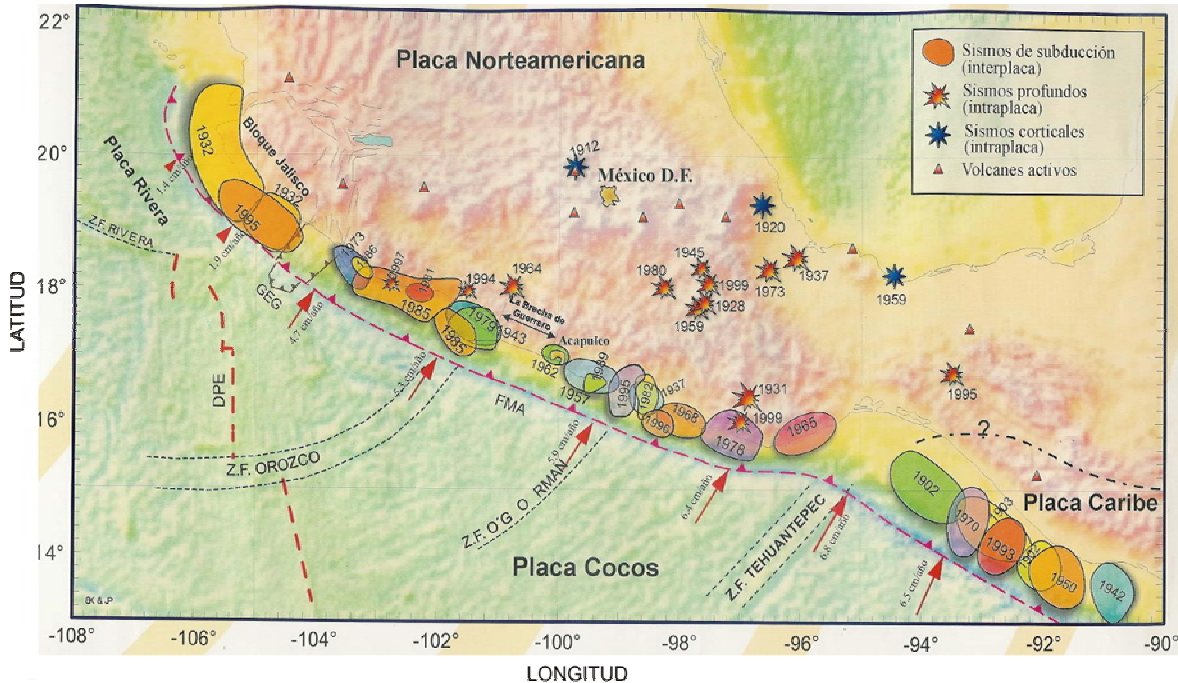


Figura 5 Localización de algunos sismos importantes en México (ref. 5)

Para caracterizar un sismo se requieren diversos parámetros, como son su localización epicentral, profundidad y magnitud, o algunos otros asociados con el plano de falla (orientación, buzamiento y sentido del movimiento), con la duración de la ruptura así como de la energía sísmica total e irradiada. En el caso de la magnitud su cuantificación está basada en la amplitud de las ondas sísmicas, a continuación se incluyen algunas expresiones para el cálculo de la magnitud y que fueron tomadas de la referencia 6.



$$M = \log A + f(\Delta) + c_1 + s \quad (1)$$

En la ecuación 1,  $M$  es la magnitud del sismo,  $A$  es la amplitud de la onda correspondiente,  $\Delta$  es la distancia epicentral,  $c_1$  es una constante y  $s$  es una corrección que depende de la estación de registro.

La escala de magnitud local,  $M_L$ , fue introducida por Richter en 1935, con el objetivo de clasificar los temblores del sur de California en grandes, medianos y pequeños, en donde:

$$M_L = \log A + f(\Delta) \quad (2)$$

En la ecuación 2,  $A$  es la amplitud máxima del desplazamiento, en milímetros, registrada por un sismógrafo torsional estándar Word-Anderson con periodo natural de 0.8 segundos, amortiguamiento de 80% del crítico y amplificación de 2800. No se especifica el tipo de onda, pero puede ser P, S u otra superficial. La función de atenuación  $f(\Delta)$ , fue determinada para distancias epicentrales  $\Delta \leq 600$  kilómetros, a partir de temblores del sur de California. Fue definida de suerte que si  $A = 1\mu$  y  $\Delta = 100$  Km, sea  $M_L = 0$ .

La magnitud de ondas superficiales,  $M_S$ , fue introducida por Gutenberg en 1945, pensada esencialmente para temblores someros, y se define para los componentes horizontales y vertical según las expresiones 3 y 4 correspondientemente.

$$M_S = \log A + 1.656 \log(\Delta) + 1.818 + s \quad (3)$$

$$M_S = \log\left(\frac{A}{T}\right) + 1.66 \log(\Delta) + 3.3 \quad (4)$$

Donde  $T$  es el periodo de las ondas.

Gutenberg, también introdujo una escala de magnitud basada en ondas de cuerpo,  $M_B$ . En esta escala se mide la amplitud máxima de un grupo de ondas y puede usarse para temblores superficiales, intermedios y profundos. El periodo de las ondas usadas es generalmente de entre 0.5 y 12 segundos.

$$M_B = \log\left(\frac{A}{T}\right) + Q(\Delta, h) \quad (5)$$

En la ecuación 5,  $Q$  es un factor de atenuación que está en función de la distancia,  $\Delta$ , en grados y la profundidad focal,  $h$ , en kilómetros.

Otra escala de magnitud usada es  $M_b$ , la que se calcula a partir de la máxima amplitud de las ondas "P" en los primeros ciclos del registro, obtenido con un instrumento de periodo natural de un segundo en el componente vertical. Generalmente, el periodo natural de la onda usada en el cálculo es también de un segundo. Para calcularlo se usa la ecuación 5, pero cambia el periodo de la onda y la manera de medir la amplitud máxima. Existe una extensión de la escala  $M_b$  conocida como  $\hat{m}_b$ , donde en vez de medir la amplitud máxima en los primeros ciclos de ondas primarias, se mide la amplitud máxima en todo el grupo de estas ondas.

Otra escala de magnitud es la  $M_w$ , basada en el momento sísmico,  $M_0$  y está definida por:

$$M_w = \frac{2}{3}(\log M_0 - 16.1) \quad (6)$$

En la ecuación 6,  $M_0 = \mu \cdot S \cdot \bar{u}$ , donde  $\mu$  es el módulo de rigidez al corte del material involucrado en falla,  $S$  es el área de la zona de ruptura y  $\bar{u}$  es el deslizamiento promedio en la superficie de falla.

Las escalas de magnitud están relacionadas con la energía liberada por el fenómeno sísmico, sin embargo existen otras que están asociadas con los daños producidos por el sismo y son conocidas como de intensidad. Ambas escalas son necesarias puesto que miden aspectos diferentes de la ocurrencia de un temblor. Así, mientras la escala de magnitud está relacionada con el proceso físico mismo, la intensidad lo está con el impacto del evento en la población, las construcciones y la naturaleza.

Como es natural, el primer intento para catalogar los temblores se hizo por medio de una clasificación empírica que tomaba en cuenta únicamente los efectos observables. Se propusieron escalas para clasificar el tamaño de los temblores desde los últimos años del siglo pasado. En 1902, Mercalli propuso una tabla, que fue posteriormente modificada en 1931 y desde entonces se ha llamado escala Modificada de Mercalli, esta no es única pero sí la más frecuentemente usada en nuestro continente. Consta de 12 grados de intensidad, como puede apreciarse en la tabla 1, en donde se incluyen también las características de cada grado, que es denotado por números romanos del I al XII.

Dicha escala permite describir de manera sucinta los efectos de un temblor. Por otra parte los daños causados por un sismo se concentran en las cercanías de la fuente, la distribución de intensidades permite estimar el epicentro; sin embargo, es en gran medida subjetiva y no permite la comparación de los sismos entre sí puesto que, por ejemplo, un sismo de cierta magnitud puede causar más daños a una población si esta se encuentra cercana al epicentro, que uno mayor pero a mas distancia. Por otro lado, no proporciona información sobre la energía u otra variable física liberada en el temblor. Así pues es necesario catalogar temblores de acuerdo con los procesos físicos de la fuente; pero también de manera tal que puedan ser medidos a través del registro gráfico o numérico que de ellos se obtenga.

Tabla 1. Escala de Mercalli modificada en 1931 por Wood y Neuman (ref. 7)

<b>Grado</b>	<b>Descripción</b>
I Muy débil	No se advierte sino por unas pocas personas y en condiciones de perceptibilidad especialmente favorables.
II Débil	Se percibe sólo por algunas personas en reposo, particularmente aquellas que se encuentran ubicadas en los pisos superiores de los edificios.
III Leve	Se percibe en los interiores de los edificios y casas.
IV Moderado	Los objetos colgantes oscilan visiblemente. La sensación percibida es semejante a la que produciría el paso de un vehículo pesado. Los automóviles detenidos se mecen.
V Bastante fuerte	La mayoría de las personas lo percibe aún en el exterior. Los líquidos oscilan dentro de sus recipientes y pueden llegar a derramarse. Los péndulos de los relojes alteran su ritmo o se detienen. Es posible estimar la dirección principal del movimiento sísmico.
VI Fuerte	Lo perciben todas las personas. Se siente inseguridad para caminar. Se quiebran los vidrios de las ventanas, la vajilla y los objetos frágiles. Los muebles se desplazan o se vuelcan. Se hace visible el movimiento de los árboles, o bien, se les oye crujir.
VII Muy fuerte	Los objetos colgantes se estremecen. Se experimenta dificultad para mantenerse en pie. Se producen daños de consideración en estructuras de albañilería mal construidas o mal proyectadas. Se dañan los muebles. Caen trozos de mampostería, ladrillos, parapetos, cornisas y diversos elementos arquitectónicos. Se producen ondas en los lagos.
VIII Destructivo	Se hace difícil e inseguro el manejo de vehículos. Se producen daños de consideración y aún el derrumbe parcial en estructuras de albañilería bien construidas. Se quiebran las ramas de los árboles. Se producen cambios en las corrientes de agua y en la temperatura de vertientes y pozos.
IX Ruinoso	Pánico generalizado. Todos los edificios sufren grandes daños. Las casas sin cimentación se desplazan. Se quiebran algunas canalizaciones subterráneas, la tierra se fisura.
X Desastroso	Se destruye gran parte de las estructuras de albañilería de toda especie. El agua de canales, ríos y lagos sale proyectada a las riberas.
XI Muy desastroso	Muy pocas estructuras de albañilería quedan en pie. Los rieles de las vías férreas quedan fuertemente deformados. Las cañerías subterráneas quedan totalmente fuera de servicio.
XII Catastrófico	El daño es casi total. Se desplazan grandes masas de roca. Los objetos saltan al aire. Los niveles y perspectivas quedan distorsionados.

Una forma instrumental de medir el movimiento sísmico y su duración en un determinado sitio es mediante el uso de sismógrafos y/o acelerógrafos. Los primeros registran la historia de velocidades del punto de medición y los segundos las de aceleraciones.

Ambos son instrumentos altamente sensibles al movimiento del suelo, lo que les permite detectar con suma precisión el instante mismo del inicio de un sismo, así como su terminación (ref. 8). El ser humano, a diferencia, no tiene una percepción tan desarrollada en este sentido, en general sólo es capaz de percibir la parte más intensa del movimiento. Esto quiere decir que si una persona y un instrumento miden la duración de un mismo sismo, aquella reportará un tiempo de movimiento bastante menor al registrado por el equipo.

Sin embargo, aún cuando la medición se realice instrumentalmente, la duración del movimiento en áreas cercanas al epicentro es diferente a la registrada en zonas más lejanas. De hecho, si el factor distancia fuera constante, dicha duración variará dependiendo de las condiciones del suelo o de si la medición se realizó sobre alguna estructura. En los registros obtenidos instrumentalmente, la duración de la parte intensa de un sismo se observa como el intervalo de tiempo en el que las amplitudes son visiblemente mayores al resto.

La duración de la fase intensa y las amplitudes del movimiento sísmico han sido asociadas al nivel de daño que experimentan suelos y estructuras por lo que la cuantificación de la primera ha sido motivo de diversos estudios, entre ellos están la metodología propuesta por Arias (ref. 9) en donde la duración de la fase intensa ( $t_d$ ), se basa en la acumulación de la energía durante un cierto intervalo. Este procedimiento requiere de un registro instrumental, por lo que no es posible utilizarlo con carácter predictivo. Algunos otros autores (ref. 10) han propuesto expresiones que son función de la magnitud, la distancia focal y el periodo del sitio de registro, para determinar la duración de dicha fase intensa.

**Objetivo.** En esta tesis se propone un método alternativo neuronal para estimar la duración de la fase intensa del movimiento sísmico, utilizando los registros obtenidos en cinco estaciones de la Red Acelerográfica de la Ciudad de Oaxaca.

**Contenido.** El capítulo I expone la ubicación de las estaciones de la Red Acelerográfica de la Ciudad de Oaxaca, así como sus características preponderantes concernientes al trabajo, al igual que la manera convencional de construir las estaciones y los registros obtenidos en ellas. En el capítulo II se muestran dos métodos de cálculo de la duración de la fase intensa así como los parámetros requeridos en la determinación de la misma. Para el capítulo III, utilizando los conceptos de redes neuronales artificiales, con arquitecturas de aprendizaje progresivo mediante un algoritmo de propagación rápida, se propone un método alterno para estimar la duración de la fase intensa del movimiento sísmico. Los resultados de entrenamiento y prueba se incluyen en el capítulo IV comparándolos con otros métodos. Finalmente se presentan las conclusiones del trabajo.

## **I. RED ACELEROGRÁFICA EN LA CIUDAD DE OAXACA**

### **I.1 Localización de las estaciones**

La ciudad de Oaxaca se ha visto afectada por eventos sísmicos generados tanto en la zona de subducción mexicana como continente adentro (ref. 11), tal es el caso de los temblores de 1931 ( $M=7.8$ ), 1980 ( $M=7.1$ ) y recientemente los del 15 de junio ( $M=7$ ) y 30 de septiembre de 1999 ( $M=7.6$ ). Sin embargo, poco se conoce acerca de la respuesta sísmica del subsuelo de la ciudad de Oaxaca y la forma en que los efectos de sitio modifican los movimientos sísmicos, por lo que, con el objetivo de estudiar estos aspectos, se instaló la red de acelerógrafos en dicha ciudad.

Pese a que en 1970 no se pensaba en una instrumentación sísmica local se instaló, en esos años, en la facultad de medicina de la Universidad Autónoma Benito Juárez de la ciudad de Oaxaca, la estación OAXM. Posteriormente, en 1998 se implementó la estación OXLC en la ciudad de las Canteras, construida sobre un afloramiento de roca.

Durante los meses de septiembre y octubre de 1999 se construyeron e instrumentaron por parte del Instituto de Ingeniería, UNAM (II-UNAM), 5 estaciones acelerográficas en diferentes tipos de suelo dentro de la ciudad; la selección de los sitios se realizó considerando la zonificación preliminar establecida para el valle de Oaxaca en 1991, en ésta se tomó en cuenta la formación geotécnica disponible y un estudio de amplificación relativa de vibración ambiental, lo que permitió definir curvas de isoperíodos, niveles de amplificación relativa, y un mapa de microzonificación sísmica.

Una visión general de la ubicación de las 7 estaciones acelerográficas, sobre la microzonificación, se presenta en la figura I.1. Cabe señalar que la Red Acelerográfica de la Ciudad de Oaxaca (RACO) inició su operación formal en octubre de 1999. Las 5 estaciones restantes se localizan específicamente en: las instalaciones de la División de Ciencias de la Tierra del Instituto Tecnológico de Oaxaca (OXTO), en el jardín de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma Benito Juárez (OXCU), y tres más en la zona histórica de la ciudad, en las escuelas primarias Mugica (OXPM) y Benito Juárez (OXBJ), y finalmente en la

Alameda de León frente a la Catedral de Oaxaca (OXAL). Además, en la Tabla I.1 se incluye información relevante relacionada con la ubicación de las estaciones como es el lugar de desplante y localización de las mismas.

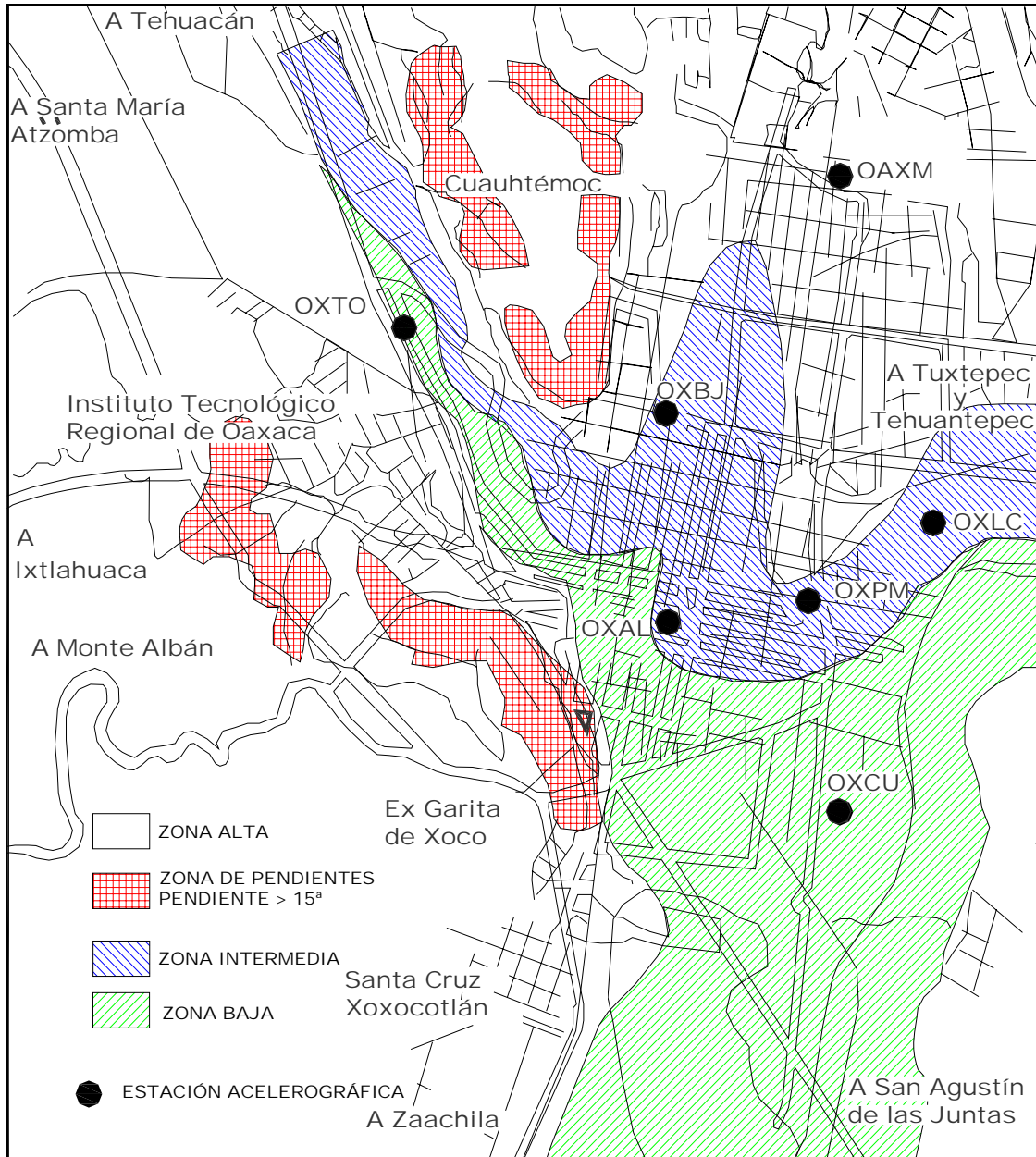


Figura I.1 Estaciones acelerográficas de la RACO (ref. 12)



Tabla I.1. Características de las estaciones del II-UNAM

CLAVE	LUGAR DE DESPLANTE	LATITUD NORTE	LONGITUD OESTE	LOCALIZACIÓN
OAXM	Aluvial	17.084	96.716	Fuente de las Siete Regiones a 2 kilómetros del centro de Oaxaca
OXLC	Roca, Cantera	17.060	96.700	Parque Las Canteras, junto al estadio de fútbol
OXAL	Suelo	17.061	96.726	Frente a la catedral, en el centro de Oaxaca
OXBJ	Suelo	17.067	96.744	Instalaciones de la escuela primaria Benito Juárez
OXCU	Arcilla	17.049	96.713	Estacionamiento de la Facultad de Arquitectura en CU, Oaxaca
OXTO	Aluvial	17.078	96.744	Instalaciones del Instituto Tecnológico de Oaxaca, División de Ciencias de la Tierra
OXPM	Suelo	17.061	96.717	Instalaciones de la escuela primaria Mugica

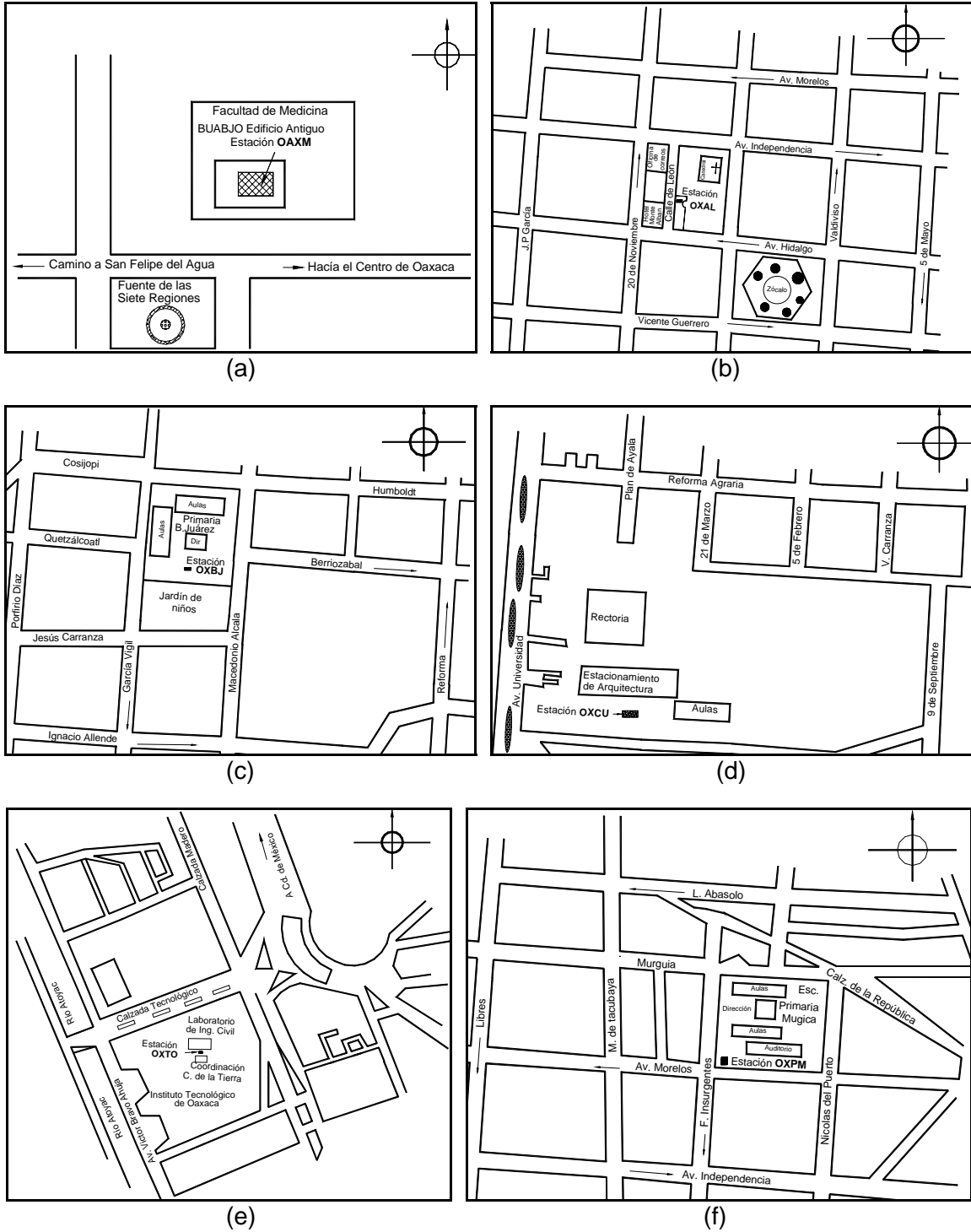
El arreglo de las estaciones de la RACO se determinó bajo la consideración de los siguientes criterios:

- Alcanzar una cobertura general de una zona urbana de alto riesgo sísmico en la ciudad, de acuerdo a la microzonificación preliminar.
- Instrumentar sitios con diferentes condiciones de subsuelo.
- Contar con una referencia en roca.

Dado que la instalación de una estación sísmica se planea para que opere por tiempo indefinido, fueron consideradas localidades apropiadas que brinden seguridad y que ofrezcan libre acceso para la recolección de datos. También, debe procurarse la mejor protección contra la intemperie y el fácil acceso a la acometida de corriente eléctrica. Por lo anterior se han preferido áreas dentro de algún parque, escuela u oficina que brinden las ventajas antes descritas.

Una vez determinado el sitio, se realizan pruebas de ruido sísmico para detectar probables fuentes de perturbación que originen falsas activaciones de los acelerógrafos, las cuales pueden saturar su capacidad de almacenamiento e

introducir alteraciones relevantes en los registros. Las pruebas se realizan colocando un equipo acelerográfico en el punto previamente seleccionado y se opera a diferentes niveles de activación durante algunos minutos. En la figura 1.2 se muestran croquis de localización de las estaciones.



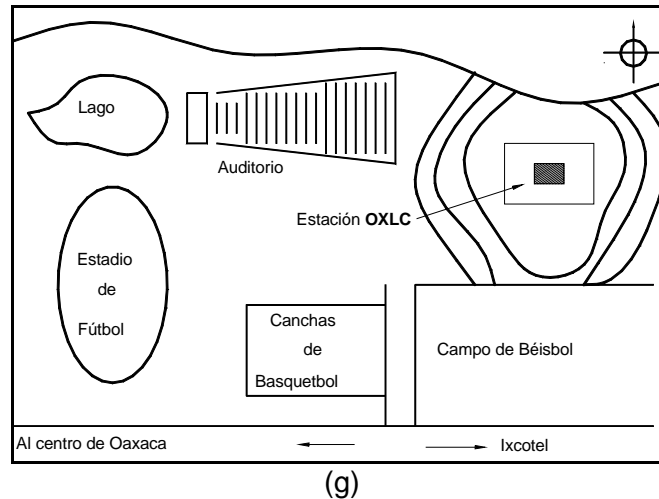


Figura I.2 Ubicación de las estaciones acelerográficas de la RACO: (a) OAXM, (b) OXAL, (c) OXBJ, (d) OXCU, (e) OXTO, (f) OXPM y (g) OXLC (ref. 13)

## I.2 Proceso constructivo

El principio fundamental para construir una estación acelerográfica es desplantar una base de concreto colada in situ sobre el depósito original del suelo, mediante un procedimiento diseñado por el II-UNAM, que permita en lo posible no alterar las propiedades mecánicas del estrato original y que la base de concreto quede perfectamente acoplada al terreno natural de tal forma que por fuerte que sea el movimiento sísmico no exista la posibilidad de algún desplazamiento relativo entre ambos.

Para evitar los desplazamientos relativos entre el suelo y la base de la estación, debe hacerse una excavación perimetral de un metro de profundidad, colando directamente en ella sin colocar cimbra, a manera de que la masa del terreno natural quede rodeada y sujeta por el concreto. El procedimiento de construcción en una base rocosa consiste en perforar al menos 3 barrenos de aproximadamente 30 centímetros de profundidad, para anclar la base de concreto. Exceptuando OXLC, que fue anclada en roca, las estaciones de la RACO se desplantaron sobre suelo.

Como sistema de protección contra la intemperie y el vandalismo las estaciones cuentan con una caja fija metálica de 0.64 centímetros de espesor y adaptada con

un candado especial de dos llaves, como la mostrada en la figura I.3. Por dentro se encuentra dividida en dos compartimentos, uno con espacio suficiente para albergar el acelerógrafo, y otro para resguardar las baterías. La tapa de la caja tiene un par de perforaciones para liberar la acumulación de gases generados por el ácido de la batería y que de otra forma pudieran dañar el equipo electrónico.

Finalmente, una lámina de acero que hace las veces de sombrilla, cubre la caja y sobresale ligeramente para evitar la radiación directa del sol durante el día, controlando la variación de la temperatura dentro de la caja.

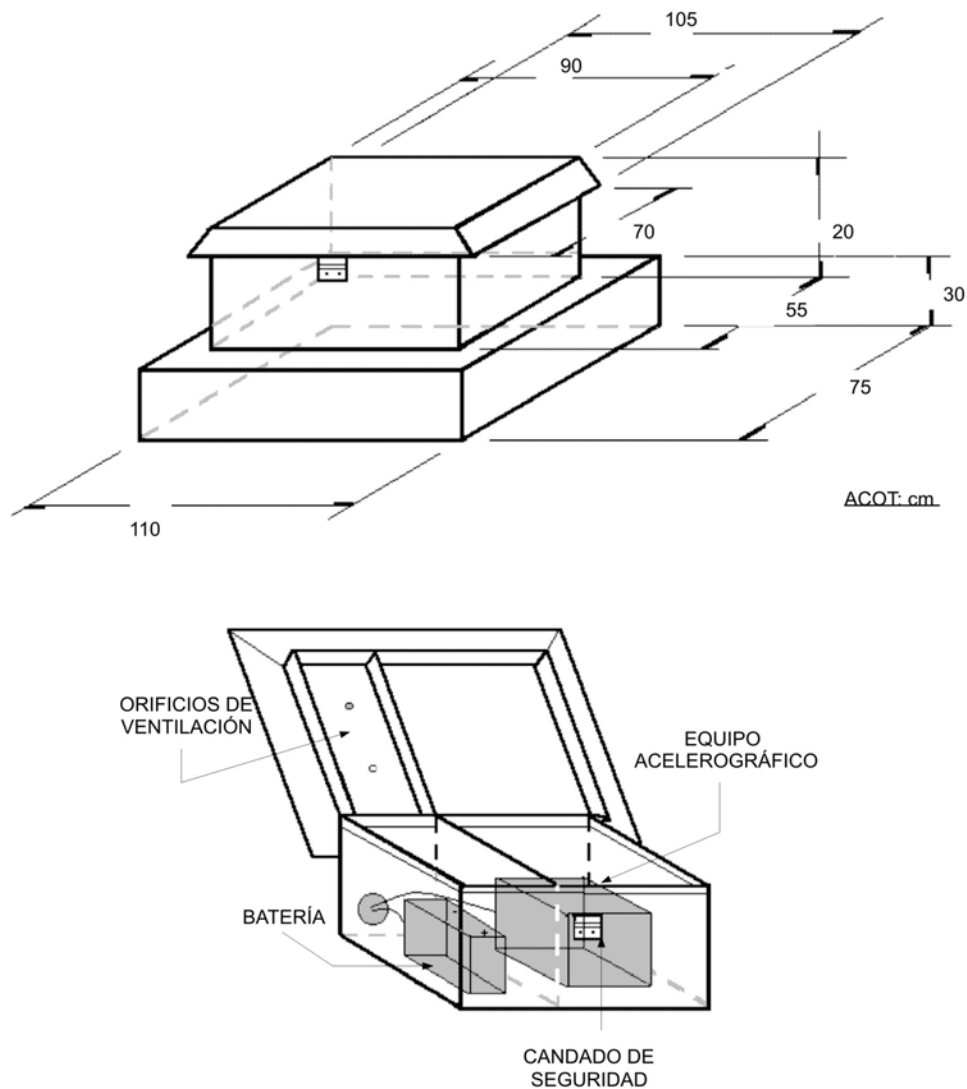


Figura I.3 Caja metálica que aloja el acelerógrafo (ref. 14)

La alimentación de energía se hace a través de una celda solar que se monta en una torre de 6 a 9 metros de altura. Cuando se tiene la posibilidad de tomar la energía eléctrica de una conexión cercana, se utilizan ambas alternativas. Para el caso de la RACO, solo OXLC no cuenta con ambas. La figura I.4 muestra el aspecto de la estación OXLC, y la figura I.5 el de las estaciones desplantadas en suelo blando.

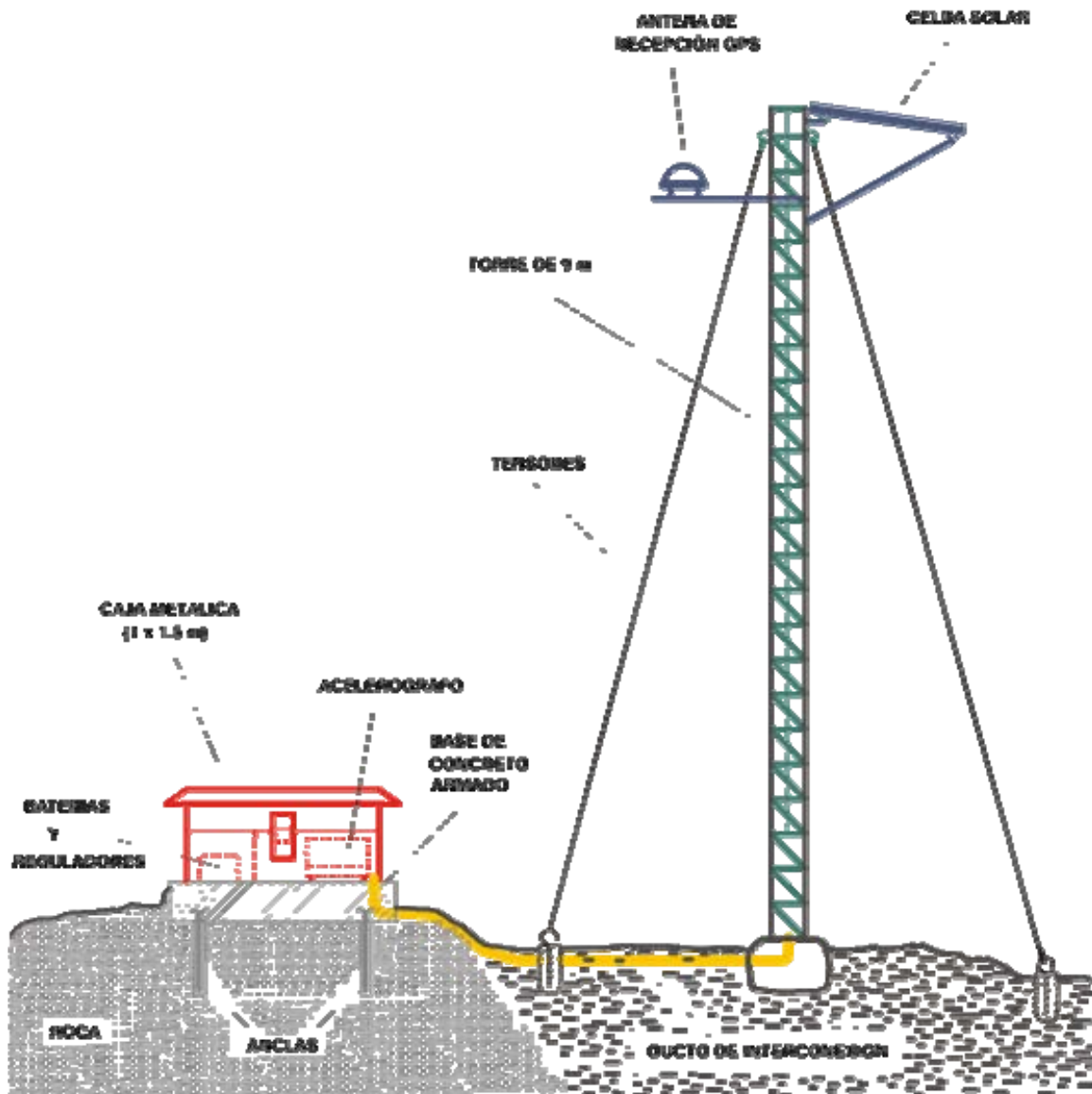


Figura I.4 Aspecto de la estación OXLC desplantada en roca (ref. 15)

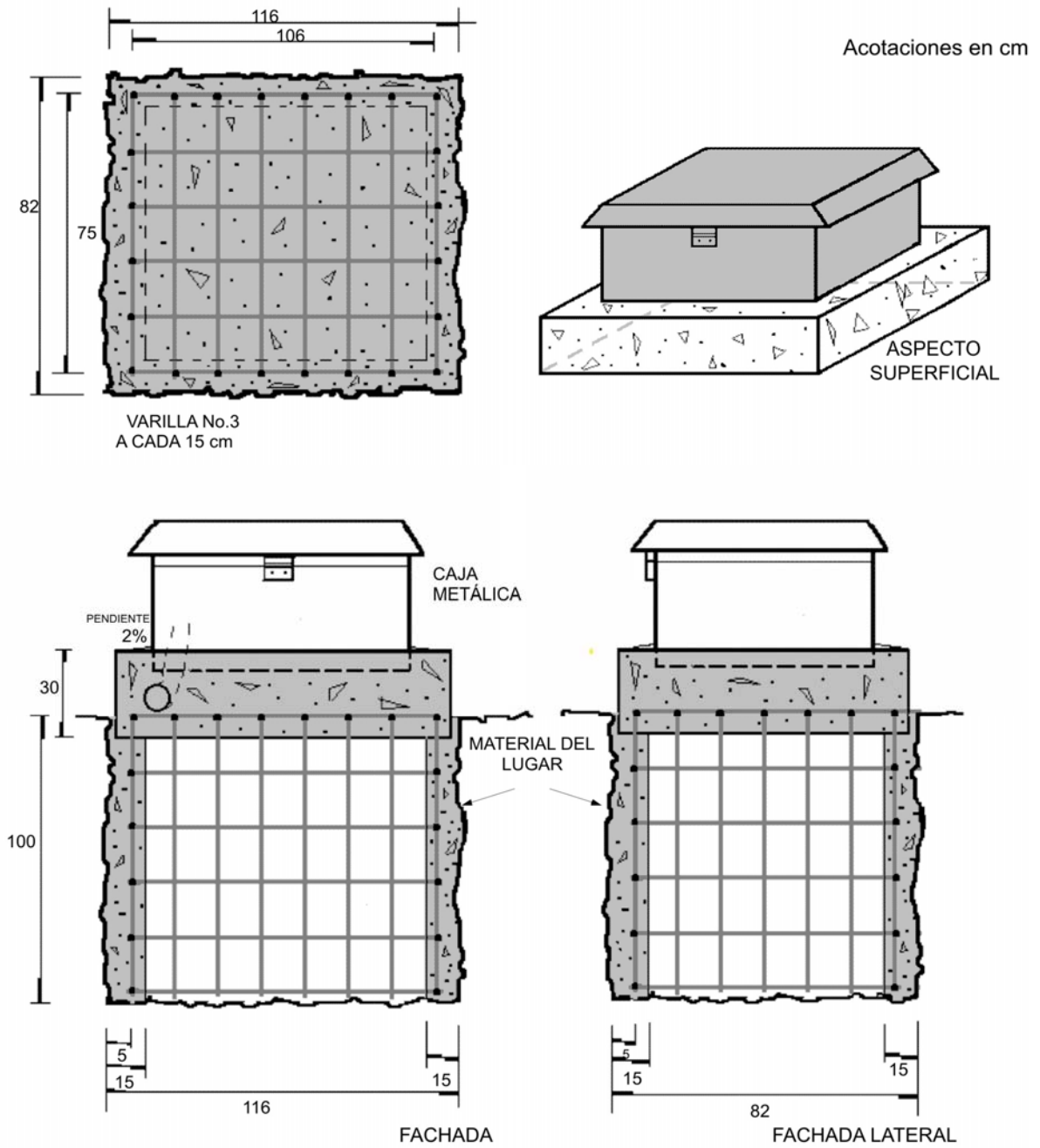


Figura I.5 Proceso de desplante en suelo blando (ref. 16)

### I.3 Registros obtenidos

A continuación se hace una breve descripción acerca del procesamiento de los registros acelerográficos.

Los datos de un registro, recolectados en visitas de campo o por medio de interrogación remota, son almacenados principalmente en cintas magnéticas y memorias de estado sólido. El primer paso para su obtención es corroborar que los eventos generados se encuentren asociados con algún sismo confirmado por el Servicio Sismológico Nacional (SSN), pues no todos estos se deben a movimientos sísmicos, ya que los niveles de activación pueden ser alcanzados por vibraciones producidas por otras fuentes, tales como el tránsito vehicular, golpes fortuitos, etc.

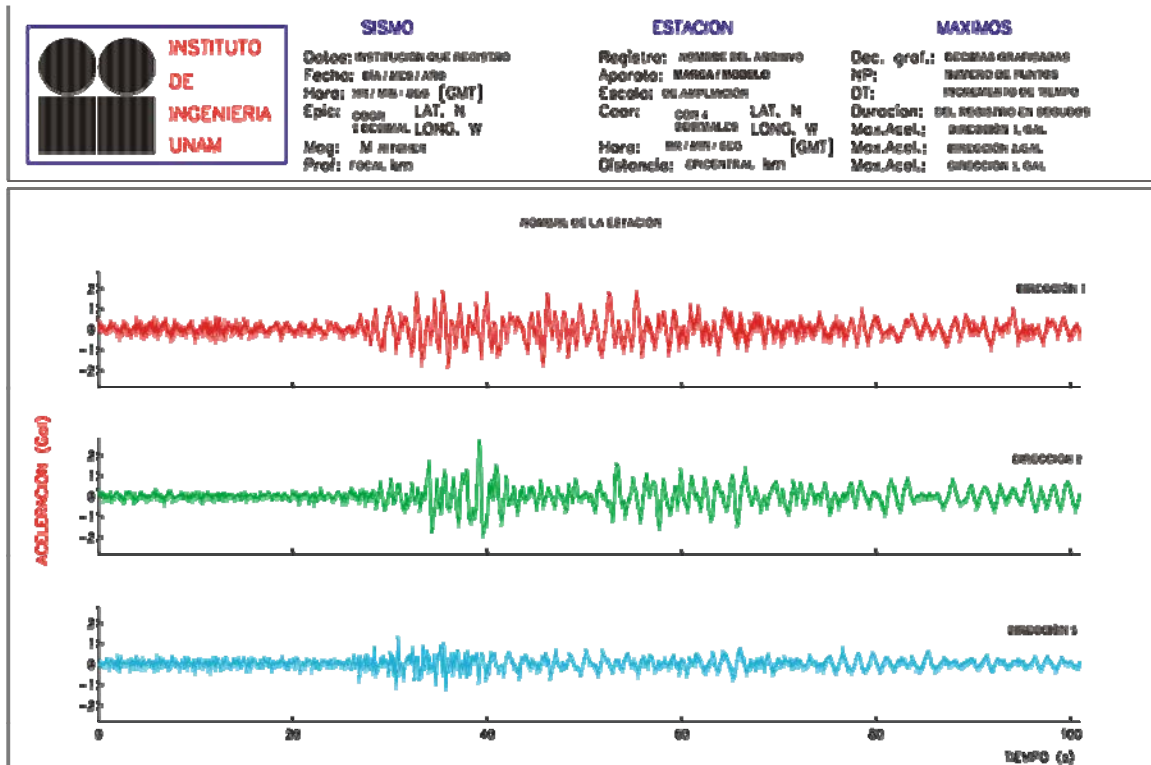


Figura I.6 Acelerograma de un registro sísmico

La información es convertida a un archivo con formato estándar denominado ASA 2.0 (ref. 17). Dicho archivo está integrado por dos bloques: un encabezado y otro que contiene los datos numéricos de aceleración. La figura I.6 presenta una gráfica

de un archivo de aceleración que contiene el movimiento sísmico registrado en tres direcciones ortogonales, dos horizontales y una vertical.

Durante el periodo del 28 de agosto de 1973 al 18 de agosto de 2004 la RACO ha generado 171 acelerogramas, para cada uno de los canales orientados en las direcciones: este-oeste, norte-sur y vertical. Estos han sido producto de 67 sismos cuyas magnitudes van de 4.1 a 7.8, cabe destacar que la aceleración máxima registrada en la historia de la red ha sido de  $370 \text{ cm/s}^2$  en la estación OAXM y se generó durante el sismo del 30 de septiembre de 1999 ( $M=7.5$ ).

La figura I.7 muestra los epicentros de los sismos registrados por la RACO, distinguidos los superficiales de los profundos. La numeración que se aprecia está integrada en la tabla I.2, donde se muestra también la fecha de ocurrencia en nueve números, los cuatro primeros se refieren al año, los dos posteriores al mes, los siguientes dos al día, y el último representa el evento. Los datos restantes son: magnitud, distancia(s) epicentral(es) a la(s) estación(es), profundidad, coordenadas (latitud y longitud), y estación(es) de registro.



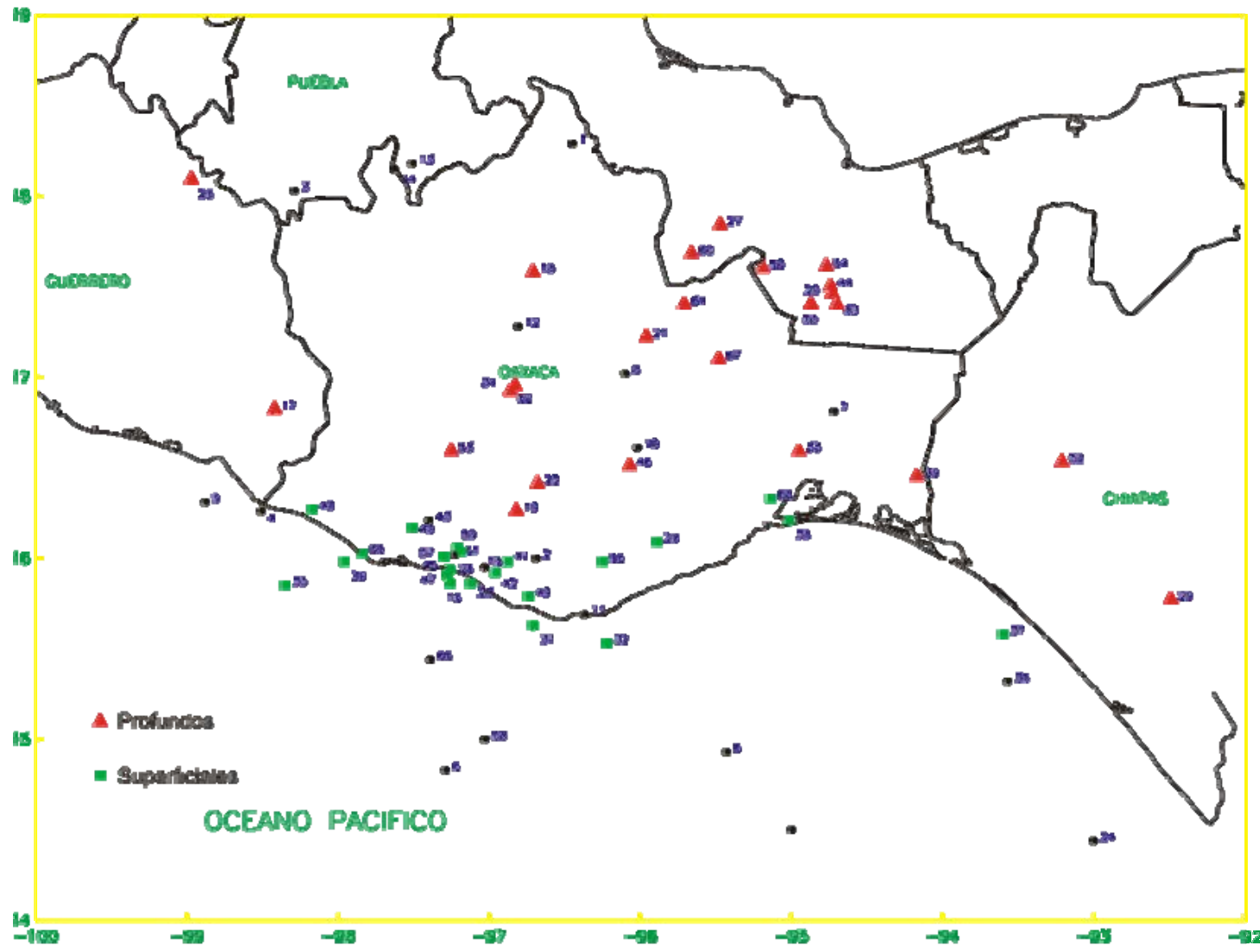


Figura I.7 Localización de los epicentros de los sismos registrados en la RACO de 1973 a 2004

Tabla I.2 Registros de la RACO de 1973 a 2004 (ref. 18)

No	Sismo	M	De (km)	Prof (Km)	Coordenadas		Estación(es) de registro
					Lat N	Long W	
1	197308281	6.8	136	84	18.29	-96.45	OAXM
2	197811291	7.8	120	19	16	-96.69	OAXM
3	198010241	7	197	70	18.03	-98.29	OAXM
4	198206072	7	212	24	16.26	-98.51	OAXM
5	198301241	5.3	275	33	14.93	-95.43	OAXM
6	199407041	5.9	257	31	14.83	-97.29	OAXM
7	199408271	5	215	115	16.81	-94.72	OAXM
8	199408281	5.4	66	22	17.02	-96.1	OAXM
9	199509141	7.3	246	22	16.31	-98.88	OAXM
10	199604011	5	91	39	16.61	-96.02	OAXM
11	199802031	6.4	159	33	15.69	-96.37	OAXM
12	199805021	4.4	24	91	17.28	-96.81	OAXM
13	199906151	7	148, 151	69	18.18	-97.51	OAXM, OXLC
14	199906152	4.5	153, 156	34	18.15	-97.63	OAXM, OXLC
15	199909301	7.6	130, 128	16	15.95	-97.03	OAXM, OXLC
16	199910071	4.4	145, 145	28	15.86	-97.26	OXAL, OXTO
17	199910251	4.6	181	25	16.82	-98.42	OXTO
18	199911061	4.5	55, 58, 58, 58, 57	84	17.58	-96.71	OAXM, OXAL, OXLC, OXPM, OXTO
19	199911101	4.3	89, 89, 90	87	16.26	-96.82	OXAL, OXPM, OXTO
20	199911291	4.4	218	145	17.46	-94.73	OXTO
21	199912171	4.4	82, 85	143	17.22	-95.96	OXPM, OXTO
22	200001191	4.5	72, 72, 75	28	16.41	-96.68	OXLC, OXPM, OXTO
23	200003011	4.7	142, 140, 140, 141	16	15.86	-97.12	OAXM, OXLC, OXPM, OXTO
24	200003121	6.4	491, 496	20	14.44	-93	OXLC, OXTO
25	200005101	4.7	130, 128, 128	28	16.02	-97.23	OAXM, OXPM, OXTO
26	200007211	5.9	261	47	18.09	-98.97	OXTO
27	200008171	4.4	159	42	17.84	-95.47	OXTO
28	200009291	4.7	138, 138, 142	63	16.09	-95.89	OXLC, OXPM, OXTO
29	200010171	5.4	477	141	15.77	-92.49	OXTO
30	200101261	5	178	84	15.98	-97.96	OXTO
31	200102191	4.8	160	10	15.63	-96.71	OXTO
32	200102201	4.7	180	8	15.53	-96.22	OXTO
33	200109081	4.8	196 194, 195, 199	100	16.59	-94.95	OXAL, OXLC, OXPM, OXTO
34	200110031	4.4	19, 17, 17, 18, 18, 17	66	16.95	-96.83	OAXM, OXAL, OXBJ, OXLC, OXPM, OXTO
35	200111101	6	220, 219	20	15.85	-98.35	OXPM, OXTO
36	200111281	6	391	70	15.32	-93.57	OXTO
37	200201161	6.3	370, 371, 375	36	15.58	-93.6	OXLC, OXPM, OXTO
38	200201301	5.1	145, 147, 146, 147, 147	115	16.21	-95.02	OAXM, OXBJ, OXLC, OXPM, OXTO

Tabla I.2 (Continuación)

No	Sismo	M	De	Prof (Km)	Coordenadas		Estación de registro
					Lat N	Long W	
39	200202261	5	283	116	16.45	-94.17	OXTO
40	200205111	4.5	130, 130	30	16.17	-97.51	OXPM, OXTO
41	200206071	4.7	123, 120, 122	11	15.98	-96.88	OAXM, OXCU, OXTO
42	200206072	5.6	131, 129, 129, 128, 129, 129, 130	8	15.92	-96.96	OAXM, OXBJ, OXCU, OXAL, OXLC, OXPM, OXTO
43	200206111	4.9	218	150	17.5	-94.74	OXTO
44	200206181	4.5	139	22	15.94	-97.26	OAXM
45	200208051	5.3	94, 91, 91, 91, 95	10	16.51	-96.07	OAXM, OXCU, OXLC, OXPM, OXTO
46	200208271	4.9	143, 141, 141, 140, 142, 141, 141	45	15.91	-97.28	OAXM, OXBJ, OXCU, OXAL, OXLC, OXPM, OXTO
47	200211081	5.2	176	10	16.27	-98.17	OXTO
48	200212021	4.7	143	7	15.79	-96.74	OXTO
49	200212291	4.6	172, 173, 173, 175	131	17.6	-95.19	OAXM, OXCU, OXPM, OXTO
50	200301221	7.6	848	16	18.22	-104.6	OXLC
51	200302011	5.3	382	210	16.53	-93.21	OXTO
52	200306131	4.1	76	45	16.59	-97.25	OXTO
53	200307081	4.6	218	134	17.61	-94.77	OXTO
54	200309251	4.6	202	133	17.4	-94.87	OXTO
55	200312011	4.3	130, 128, 130, 132	50	15.98	-96.25	OXAL, OXCU, OXPM, OXTO
56	200401131	5.1	134, 131, 131, 133, 132, 132	3	16.01	-97.3	OAXM, OXCU, OXAL, OXLC, OXPM, OXTO
57	200401132	5.5	135, 133, 132, 133, 133, 134	16	15	-97.03	OAXM, OXCU, OXAL, OXLC, OXPM, OXTO
58	200401141	4.6	124	27	16.04	-97.19	OXTO
59	200401171	4.7	130, 132, 132, 130, 132, 133	109	17.68	-95.66	OAXM, OXAL, OXCU, OXLC, OXPM, OXTO
60	200402101	4.4	125, 122, 123	43	16.06	-97.21	OAXM, OXAL, OXTO
61	200402181	4.3	24, 21, 21, 23, 22, 21	71	16.92	-96.86	OAXM, OXAL, OXCU, OXLC, OXPM, OXTO
62	200404201	5.4	217, 219, 218, 218, 220	142	17.4	-94.7	OAXM, OXAL, OXCU, OXPM, OXTO
63	200405061	4.3	114, 116	63	17.4	-95.71	OXCU, OXTO
64	200406141	5.8	167, 165, 165, 165, 165	10	16.03	-97.84	OAXM, OXAL, OXCU, OXPM, OXTO
65	200408011	4.6	196, 193, 194	16	15.44	-97.39	OAXM, OXAL, OXTO
66	200408071	5.3	132, 133, 132, 130, 132, 135	106	17.1	-95.48	OAXM, OXAL, OXBJ, OXLC, OXPM, OXTO
67	200408181	5.7	188, 188, 188, 185, 187, 190	66	16.33	-95.14	OAXM, OXAL, OXBJ, OXLC, OXPM, OXTO

La estación OXTO cuenta con 50 acelerogramas para cada dirección, OAXM con 36, OXPM con 26, OXLC con 22, OXAL con 18, OXCU con 13 y OXBJ con 6.

Finalmente, la figura I.9 muestra los acelerogramas para el sismo del 7 de junio de 2002 en la componente este-oeste. Se observa que, por ejemplo, OXCU, en arcilla, tiene amplitudes muy grandes respecto a OXLC, en roca.

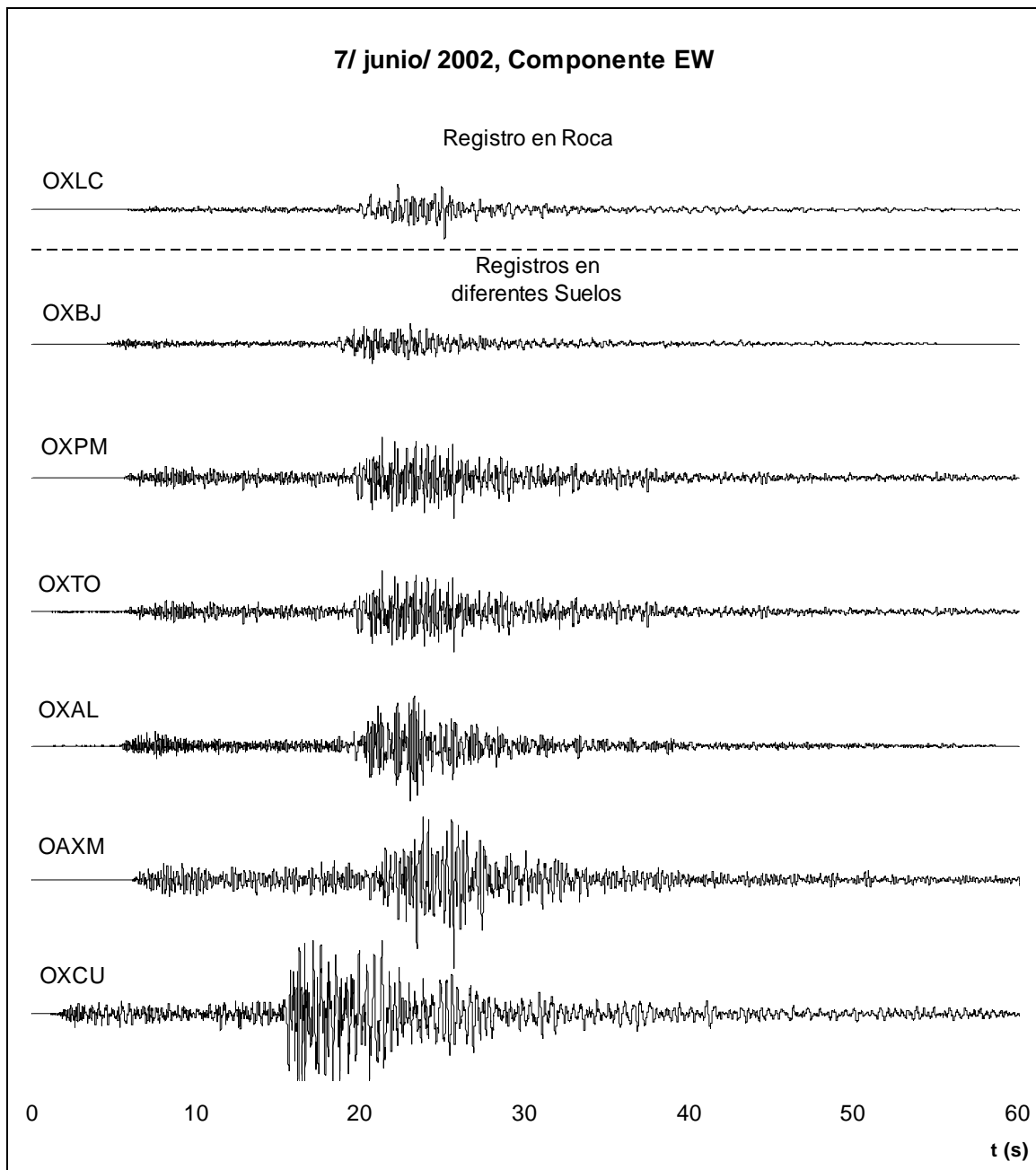


Figura I.9 Acelerogramas en las estaciones de la RACO

## II. DURACIÓN DE LA FASE INTENSA DEL MOVIMIENTO SÍSMICO

### II.1 Antecedentes

La actividad sísmica presente en la República Mexicana despierta el interés por parte de investigadores e ingenieros por desarrollar trabajos concernientes a explicar los efectos del movimiento fuerte del terreno y que, aplicando ciertos criterios y procedimientos de análisis y diseño eviten, en lo posible, el daño estructural ocasionado por los temblores.

Dentro de la ingeniería sísmica, es común hablar de la aceleración máxima del terreno en un registro como parámetro relevante para comprender los efectos causados por un temblor. Como una alternativa más, la duración de la fase intensa del movimiento del suelo durante un sismo,  $t_d$ , pretende ser una variable que ayude a entender mejor las características dinámicas del suelo y el deterioro estructural. De acuerdo con la literatura, diversas investigaciones han sido desarrolladas con el fin de explicar, en forma empírica o analítica, el concepto de la  $t_d$ , algunos investigadores la han definido como el lapso de tiempo en el que ocurren las mayores amplitudes de aceleración durante el sismo, a partir de un determinado manejo de los registros sísmicos obtenidos para una zona específica, aunque los resultados pueden ser difícilmente generalizados a todas las regiones sísmicas del mundo (ref. 19).

El manejo de datos sísmicos, y la aplicación de procedimientos para determinar la  $t_d$ , han ayudado a crear expresiones generales dependientes de otros parámetros sísmicos. Sin embargo, no se puede prescindir de los registros ya que son la base de la información más firme en la que se puede apoyar cualquier trabajo referente a la  $t_d$ , que junto con el nivel de la amplitud del movimiento y su repetición durante un cierto número de ciclos, guardan un estrecho vínculo con los daños observados en suelos y estructuras durante la ocurrencia de un sismo (ref. 20).

## II.2 Métodos de cálculo

**Criterio de Arias.** Con el objetivo de establecer una medida de la intensidad sísmica del movimiento propone la siguiente expresión (ref. 21):

$$Ia = \frac{\pi}{2g} \int_0^t a_x^2(t) dt \quad (II.1)$$

Donde  $Ia$  es la Intensidad de Arias,  $a_x(t)$  es la amplitud del movimiento,  $t$  es la duración del registro y  $g$  es la aceleración de la gravedad.

Con base en la expresión II.1 se establece una metodología gráfica para el cálculo de la duración de la fase intensa del movimiento sísmico registrado, la cual se basa en la acumulación de la energía durante un cierto intervalo. El método consiste en realizar la suma acumulada de los valores  $a_x^2(t)$ , para el acelerograma en cuestión. Específicamente se considera que la  $t_d$  se encuentra entre los límites de 5 a 95% de la intensidad de Arias.

En la figura II.1 se ejemplifica en tres gráficas la forma de calcular la  $t_d$ , según la propuesta de Arias. La primera es el vector de aceleraciones, la segunda los valores cuadráticos del mismo y la tercera el valor de la suma acumulada en porcentaje. De esta última se determinan los tiempos  $t_0$  y  $t_f$  para los cuales ocurren respectivamente el 5 y el 95% de la acumulación de la energía. Finalmente el valor de  $t_d$  queda definida por:

$$t_d = t_f - t_0 \quad (II.2)$$

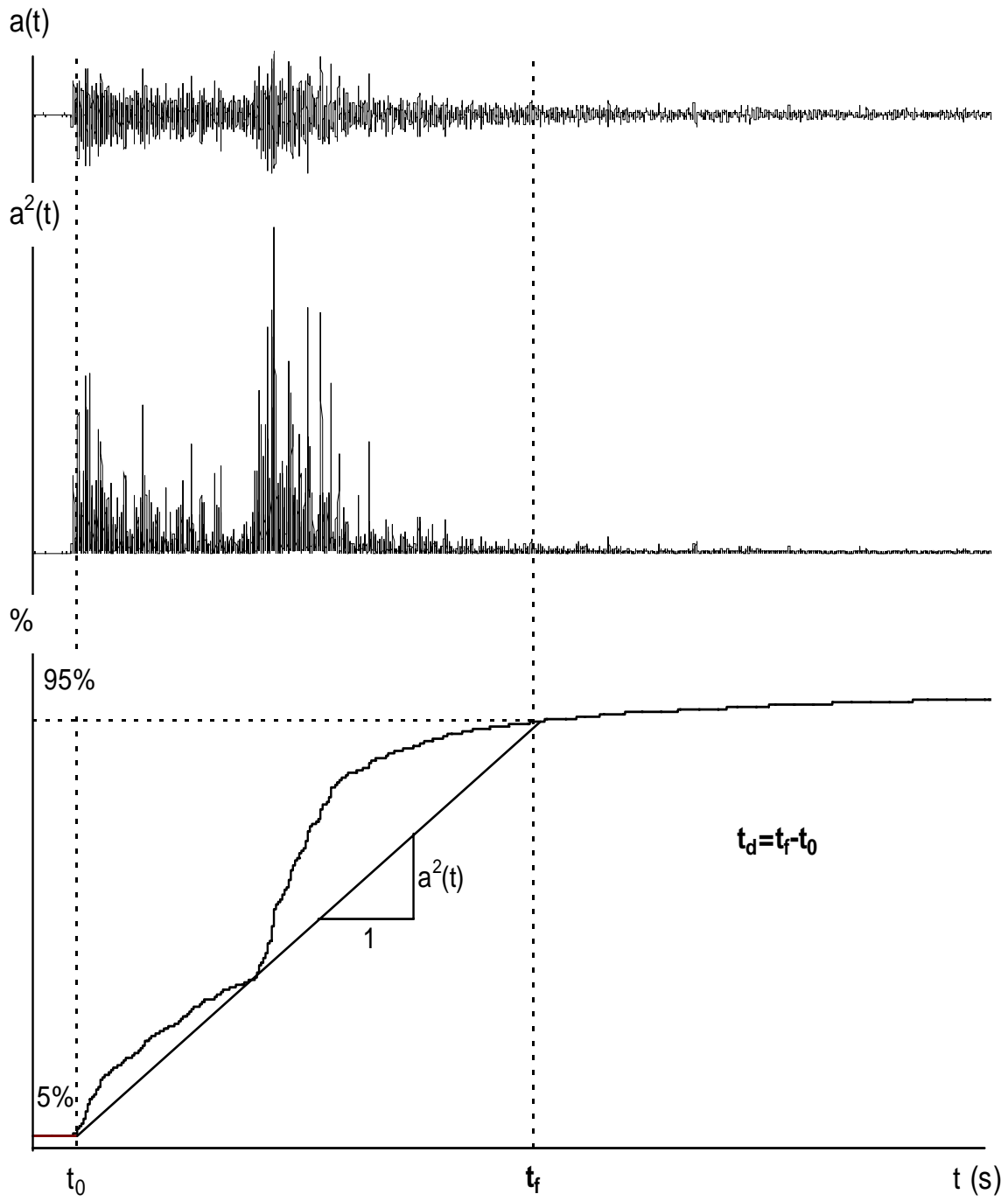


Figura II.1 Descripción del método propuesto por Arias en el intervalo 5 a 95% de liberación de energía.

**Ecuación de Reynoso y Ordaz.** Estos autores propusieron la expresión II.3 para calcular la  $t_d$  (ref. 22):

$$t_d = 0.01e^M + (0.036M - 0.07)R + (4.8M - 16)(T_s - 0.5) \quad (II.3)$$

Donde  $M$  es la magnitud del sismo,  $R$  su distancia focal a la estación de registro y  $T_s$  es el periodo natural del suelo en donde está desplantada. La determinación de la expresión se basa en un análisis de regresión lineal de los componentes horizontales de datos acelerométricos, utilizando la información de más de 800 acelerogramas generados en 200 estaciones. En la selección de los registros se omitieron aquellas que presentaban una baja relación señal-ruido así como otros que por simple inspección visual se determina que están incompletos.

La expresión II.3 la integran tres términos que representan, de izquierda a derecha, la contribución a la duración de la fase intensa de: la fuente sísmica, la distancia focal y los efectos de sitio. Para la determinación de tales términos se utilizaron registros que tuvieran una marcada influencia en cada uno de ellos, por lo que para  $0.01e^M$  se utilizaron datos en roca. El segundo término de la expresión representa la contribución a la duración con la distancia. Finalmente, el tercer miembro incluye el efecto de sitio por medio de  $T_s$ . La validación de los resultados de la expresión propuesta por estos autores, se realizó de acuerdo al criterio de Arias pero considerando que la fase intensa se encuentra dentro de los límites del 2.5 y 97.5 por ciento.



### III. MÉTODO ALTERNO NEURONAL

#### III.1 Redes neuronales artificiales

Una red neuronal artificial, RNA, es un sistema de procesamiento de información que tiene características de comportamiento inspiradas en el conocimiento existente sobre el funcionamiento de las neuronas biológicas, en los cuales y a diferencia del resto de las células vivas, destaca su capacidad de comunicarse. Entre las estructuras fundamentales de una célula nerviosa o neurona típica se encuentran las dendritas, el cuerpo o soma de la célula y un único axón (figura III.1). En términos generales, las dendritas y el cuerpo celular reciben señales de entrada, este último las combina e integra y emite otras de salida que son transportadas y distribuidas mediante el axón. De tal forma que los impulsos nerviosos recibidos pueden dar lugar a cambios locales en el potencial del cuerpo celular de la neurona receptora, es decir pueden ser excitatorios o inhibitorios. Los potenciales de entrada se suman en el montículo del axón, si la cantidad de despolarización es suficiente se genera un potencial de acción que viaja a lo largo de aquel alejándose del cuerpo celular.

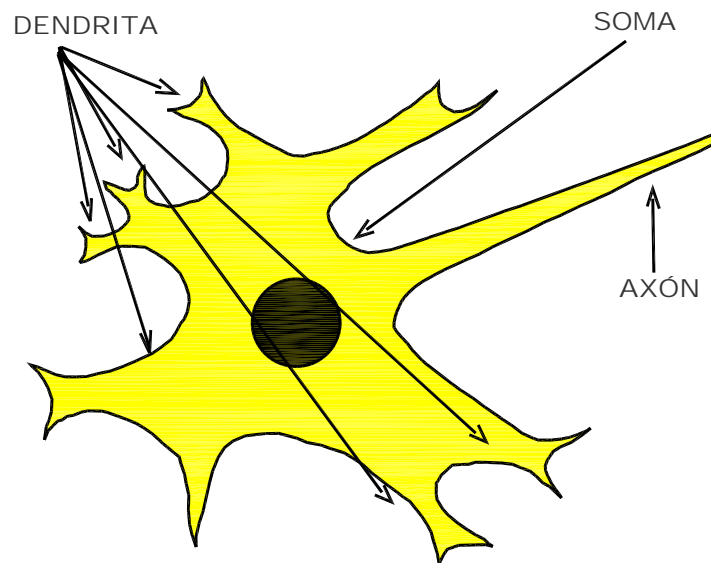


Figura III.1 Unidades de proceso de una neurona biológica (ref. 23)

En el caso de las RNA's, estas tratan de emular el comportamiento de las neuronas biológicas teniendo como unidades de procesamiento a los denominados nodos. En estos casos el proceso de aprendizaje se realiza mediante la presentación de patrones de comportamiento.

Las señales se transmiten entre las neuronas a través de conexiones sinápticas y cada enlace de conexión entre dos unidades de proceso tiene un determinado peso denominado sináptico que tiene un efecto multiplicador sobre la señal transmitida. Así cada unidad de proceso aplica una función de activación o transferencia a sus señales de entrada para determinar la correspondiente salida. En la figura III.2 se compara una neurona biológica y una artificial.

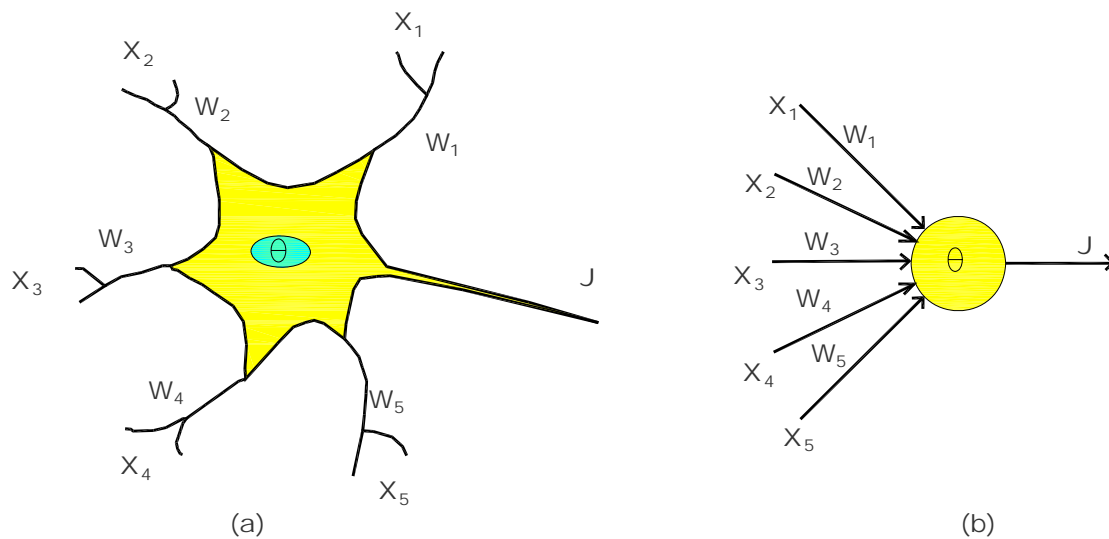


Figura III.2 a) Neurona biológica y b) Neurona artificial (ref. 24)

Las RNA's pretenden emular al cerebro humano en dos aspectos:

- adquirir conocimiento mediante un proceso de aprendizaje.
- Almacenar conocimiento utilizando los pesos "sinápticos" de las conexiones.

Una RNA está caracterizada por: su arquitectura, la dinámica de la computación que realiza y por el algoritmo de entrenamiento o aprendizaje que utiliza.

**Arquitectura.** Es la estructura o patrón de conexiones entre las unidades de proceso, existiendo varios tipos: progresiva de capas múltiples, recurrente y en cascada. Debido a que en el trabajo se utilizó el primero en la figura III.3 se ejemplifica.

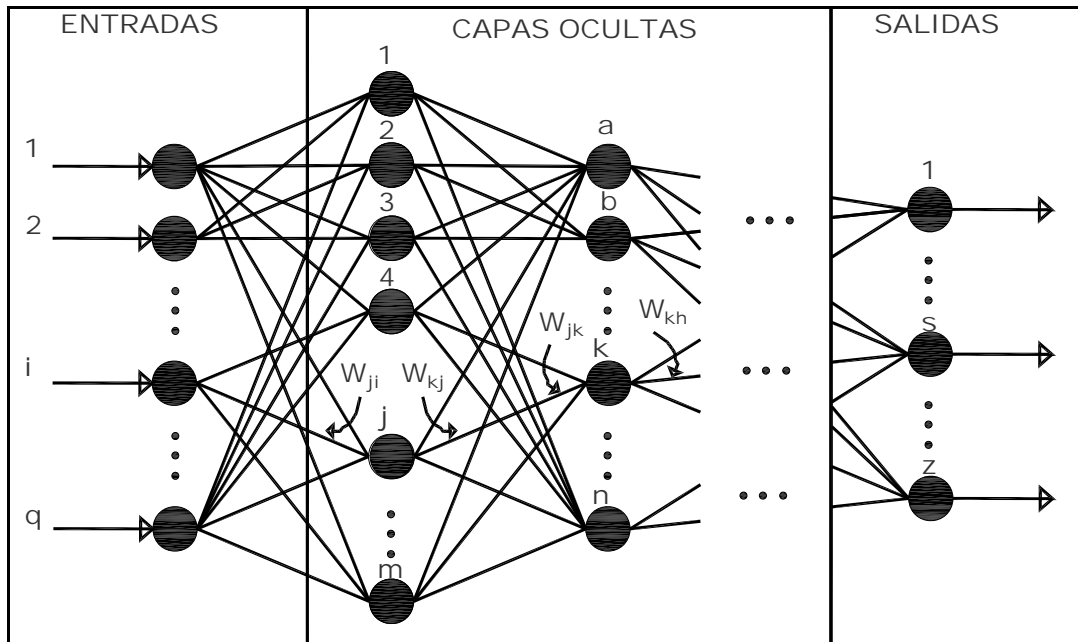


Figura III.3 Arquitectura progresiva de capas múltiples (ref. 25)

Cualquier vector de entrada está integrado por q elementos, m y n indican los correspondientes por cada capa oculta y el vector de salida contiene z elementos. La primera capa es de entrada de datos de entrenamiento y debe contener los elementos que mejor caracterizan, o caractericen completamente, al fenómeno que se quiere interpretar.

**Dinámica de la Computación.** Expresa el valor que toman las unidades de proceso y se basa en unas funciones de transferencia que especifican como se transforman las señales de entrada de la unidad de proceso en la señal de salida. Las funciones de transferencia también se presentan en una variedad respetable, se pueden mencionar entre otras: sigmoideal, arco tangente, lineal, gaussiana, senoidal, de Cauchy, etc.

En esta tesis se utilizaron como funciones de transferencia las sigmoidea y lineal, por tal razón solo se detalla lo concerniente a estas.

La función sigmoidea o sigmoidea está representada según la ecuación III.1 y en la figura III.4 se muestra su forma y se aprecia que el rango de valores resultantes está entre [0,1].

$$FT_{sigmoidea} = f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (III.1)$$

y

$$f'(x) = f(x) \cdot (1 - f(x)) \quad (III.1 a)$$

Donde  $x$  es el valor de entrada a la neurona.

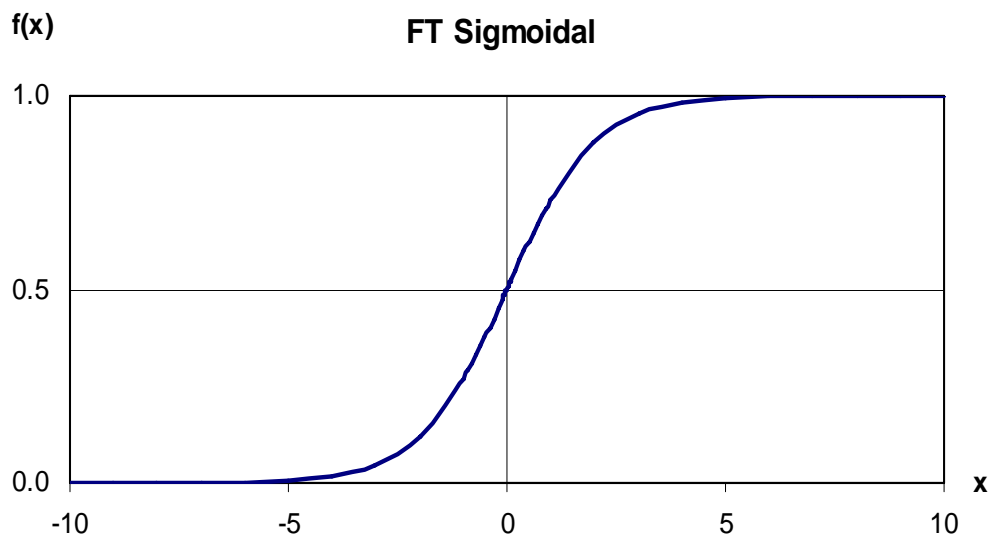


Figura III.4 Función de transferencia sigmoidea

La ecuación III.2 muestra la función de transferencia lineal y la figura III.5 su gráfica en el rango [-1,1].

$$FT_{lineal} = f(x) = x \quad (III.2)$$

y

$$f'(x) = 1 \quad (\text{III.2 a})$$

Esta función es como su nombre lo indica, una línea recta y por lo tanto no se afecta la entrada neta de cada neurona. Normalmente es utilizada para obtener una salida inalterada en la última capa de los arreglos de RNA's.

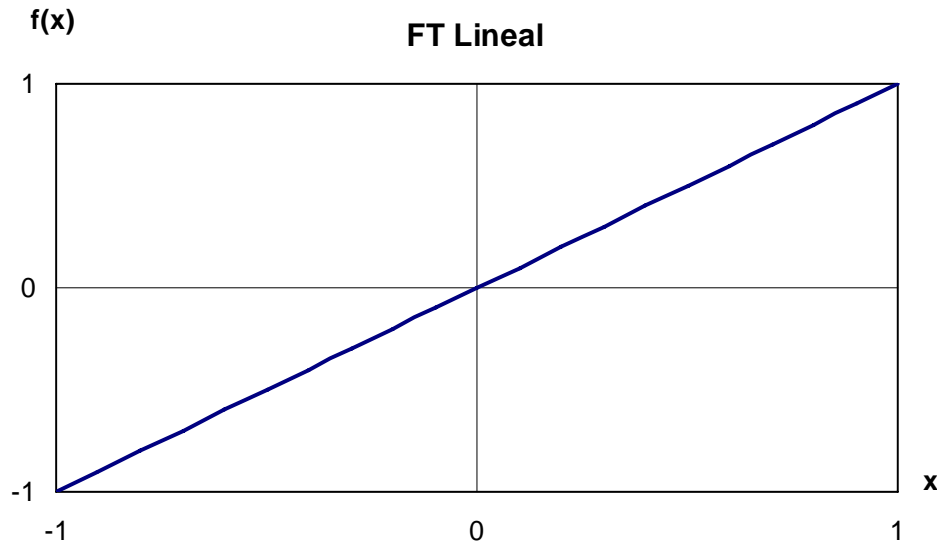


Figura III.5 Función de transferencia lineal

**Algoritmo de Entrenamiento o Aprendizaje.** Es el procedimiento seguido para determinar los pesos o resistencias de las conexiones entre nodos y que permite modificarlos para conseguir una salida deseada. Entre los existentes se pueden mencionar retropropagación, correlación en cascada, de Kohonen, vectores de aprendizaje, propagación rápida, de alineamiento simulado, etc. Sin embargo es necesario precisar que independientemente del algoritmo seleccionado es fundamental que los patrones o datos de entrenamiento representen adecuadamente al fenómeno en cuestión.

Solo se detalla el de aprendizaje por retropropagación ya que es el que se utilizó en el desarrollo de este trabajo. Este algoritmo actualiza los pesos y ganancias con base en el error cuadrático medio,  $e_m^2$ . La ecuación III.3 muestra la forma de calcular el  $e_m^2$ :

$$e_m^2 = \sum_{i=1}^y (s_{si}^{salida} - a_{si}^{salida})^2 \quad \text{III.3}$$

Donde  $s_{si}^{salida}$  es la salida deseada y  $a_{si}^{salida}$  es la salida obtenida para la neurona  $s$ , con  $y$  vectores de entrenamiento.

La ecuación III.4 muestra un vector de entrada de  $q$  elementos.

$$E = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_i \\ \vdots \\ E_q \end{bmatrix} \quad \text{III.4}$$

En el algoritmo de aprendizaje de retropropagación debe calcularse primero la entrada neta en cada neurona de cada capa debido a la influencia de las neuronas de la capa anterior ( $n_{neurona}^{capa}$ ). Con la ecuación III.5 se puede calcular la entrada neta para la neurona  $j$  de la capa  $m$ :

$$n_j^m = \sum_{i=1}^q W_{ji}^m E_i^m + b_j^m \quad \text{III.5}$$

$W_{ji}^m$ , es el peso entre la componente  $i$  de la entrada con al componente  $j$  de la capa oculta.  $E_i^m$  es el valor de entrada a la neurona  $i$  de la capa  $m$ ,  $b_j^m$  es la ganancia de la neurona  $j$  de la capa oculta  $m$ . La salida de cada neurona ( $a_{neurona}^{capa}$ ) se determina según la ecuación III.6:

$$a_j^m = f^m(n_j^m) \quad \text{III.6}$$

$f^m$ , es la función de transferencia elegida para la neurona  $j$  de la capa  $m$ .

Para la salida de la neurona  $z$  en la capa de salida, se define el error según la ecuación III.7:

$$e_z = (s_z - a_z^{salida}) \quad (III.7)$$

Donde  $s_z$  es la salida deseada, para la neurona  $z$  de la capa de salida. Luego se determina el  $e_m^2$  que es el que se quiere disminuir, para lograrlo debemos definir dos conceptos que se utilizan en nuestro algoritmo que son: la sensibilidad en la capa de salida y la sensibilidad en las capas ocultas. Las ecuaciones III.8 y III.9 definen la sensibilidad para la neurona  $z$  de la capa de salida y para la neurona  $j$  de una capa oculta o respectivamente:

$$\delta_z^{salida} = f^{salida \prime}(n_z^{salida}) \delta_z \quad (III.8)$$

$$\delta_j^o = f^{o \prime}(n_j^o) \cdot \sum_{i=1}^{\#conexiones} \delta_i^{o+1} W_{ij}^{o+1} \quad (III.9)$$

Donde  $f^{salida \prime}(n_z^{salida})$  es la derivada de la función de transferencia para el nodo  $z$  de la capa de salida,  $f^{o \prime}(n_j^o)$  es la derivada de la función de transferencia para el nodo  $j$ ,  $\sum_{i=1}^{\#conexiones} \delta_i^{o+1} W_{ij}^{o+1}$  es la suma de los productos de los errores calculados, de la capa  $o+1$ , por los pesos de todas las conexiones que unen la capa  $o$  con la capa  $o+1$ . Como los errores de los elementos de las capas se van calculando empezando por la de salida, hacia las anteriores, se denomina al algoritmo de retropropagación.

Finalmente se recalculan los pesos,  $W$ , y las ganancias,  $b$ , de las neuronas, para todas las capas. Las ecuaciones III.10 a la III.13 indican los nuevos pesos y ganancias, para el elemento  $z$  de la capa de salida y el elemento  $k$  de la capa oculta  $o$  respectivamente, con los cuales se habrá de calcular una nueva iteración. La ecuación III.14 indica la forma en que debe calcularse el peso de la siguiente iteración para un elemento  $j$  de la primera capa oculta.

$$W_z^{salida *} = W_z^{salida} - 2\alpha \delta_z^{salida} \quad (III.10)$$

$$b_z^{salida *} = b_z^{salida} - 2\alpha \delta_z^{salida} \quad (III.11)$$

$$W_k^o * = W_k^o - 2\alpha \delta_k^o \quad (III.12)$$

$$b_k^{o*} = b_k^o - 2\alpha\delta_k^o \quad (\text{III.13})$$

$$W_j^{1*} = W_j^1 - 2\alpha\delta_j^1 E_j \quad (\text{III.14})$$

Donde  $\alpha$  es una constante denominada tasa de aprendizaje y se encuentra dentro del rango [0,1]. Para el desarrollo de este trabajo se tomó el valor de  $\alpha$  como 0.01, que es el valor recomendado cuando no se tiene práctica en el diseño de redes (ref. 26). La idea del algoritmo de retropropagación es encontrar los pesos y las ganancias de cada neurona que hacen que el error sea el mínimo, cuando esto se logra se dice que la red está bien entrenada y pueden usarse esos valores de pesos y ganancias para encontrar las salidas que resultarían de cualquier vector de entrada característico del fenómeno.

La tabla III.1 esquematiza el método de cálculo del algoritmo de aprendizaje de retropropagación, la primera columna muestra el número de paso para cada capa, desde a hasta z. En la segunda columna se explica la parte del proceso que se está realizando para un elemento de cada capa. La tercera columna muestra la parte del cálculo que se realiza, es decir los datos que se deben obtener. Los subíndices y superíndices que se utilizan se tomaron de la figura III.3 que esquematiza la arquitectura de capas múltiples.



Tabla III.1 Resumen del algoritmo de retropropagación

Paso	Retórica del Proceso	Lógica del Proceso			
1(a)	Pesos en las conexiones, de un elemento j, de la 1ª capa oculta con la capa de entrada	$W_{1j}^1$	$W_{2j}^1$	...	$W_{qj}^1$
2(a)	Ganancias en las conexiones, de un elemento j, de la 1ª capa oculta con la capa de entrada	$b_{1j}^1$	$b_{2j}^1$	...	$b_{qj}^1$
3(a)	Entrada neta a un elemento j de la 1ª capa oculta	$n_j^1 = \sum_{i=1}^q W_{ij}^1 E_{ji}^1 + b_j^1$			
4(a)	Salida de un elemento j de la 1ª capa oculta	$a_j^1 = f^1 \left( \sum_{i=1}^q W_{ij}^1 E_{ji}^1 + b_j^1 \right)$			
1(b)	Pesos en las conexiones, de un elemento k, de la 2ª capa oculta con la 1ª	$W_{1k}^2$	$W_{2k}^2$	...	$W_{mk}^2$
2(b)	Ganancias en las conexiones, de un elemento k, de la 2ª capa oculta con la 1ª	$b_{1k}^2$	$b_{2k}^2$	...	$b_{mk}^2$
3(b)	Entrada neta a un elemento k de la 2ª capa oculta	$n_k^2 = \sum_{i=1}^m W_{ik}^2 a_{ki}^2 + b_k^2$			
4(b)	Salida de un elemento k de la 2ª capa oculta	$a_k^2 = f^2 \left( \sum_{i=1}^m W_{ik}^2 a_{ki}^2 + b_k^2 \right)$			
⋮	⋮	⋮			
1(z-1)	Pesos en las conexiones, de un elemento r, de la última capa oculta l con la capa anterior	$W_{1r}^l$	$W_{2r}^l$	...	$W_{lr}^l$
2(z-1)	Ganancias en las conexiones, de un elemento r, de la última capa oculta l con la capa anterior	$b_{1r}^l$	$b_{2r}^l$	...	$b_{lr}^l$
3(z-1)	Entrada neta a un elemento r de la última capa oculta l	$n_r^l = \sum_{i=1}^{\text{nodos\_capa\_anterior}} W_{ri}^l a_{ri}^l + b_r^l$			
4(z-1)	Salida de un elemento r de la última capa oculta l	$a_r^l = f^l(n_r^l)$			
1(z)	Pesos en las conexiones, de un elemento s, de la capa de salida con la capa anterior, l	$W_{1s}^{\text{salida}}$	$W_{2s}^{\text{salida}}$	...	$W_{us}^{\text{salida}}$
2(z)	Ganancias en las conexiones, de un elemento s, de la capa de salida con la capa anterior, l	$b_{1s}^{\text{salida}}$	$b_{2s}^{\text{salida}}$	...	$b_{us}^{\text{salida}}$
3(z)	Entrada neta a un elemento s de la capa de salida	$n_s^{\text{salida}} = \sum_{i=1}^l W_{si}^{\text{salida}} a_{si}^{\text{salida}} + b_s^{\text{salida}}$			
4(z)	Salida de un elemento s de la capa de salida	$a_s^{\text{salida}} = f^{\text{salida}}(n_s^{\text{salida}})$			

Tabla III.1 (Continuación)

5 (z)	Cálculo de la sensibilidad para un elemento s de la capa de salida	$\delta_s^{salida} = (s_s^{salida} - a_s^{salida}) f^{salida} (n_s^{salida})$
5 (z-1)	Cálculo de la sensibilidad para un elemento r de la última capa oculta l	$\delta_r^l = f^{l'}(n_r^l) \times \sum_{i=1}^z \delta_s^{salida} W_{si}^{salida}$
⋮	⋮	⋮
5 (b)	Cálculo de la sensibilidad para un elemento k de la 2ª capa oculta	$\delta_k^2 = f^{2'}(n_k^2) \times \sum_{i=1}^l \delta_k^3 W_{ki}^3$
5 (a)	Cálculo de la sensibilidad para un elemento j de la 1ª capa oculta	$\delta_j^1 = f^{1'}(n_j^1) \times \sum_{i=1}^m \delta_j^2 W_{ji}^2$
6 (z)	Ajuste del peso para una neurona s de la capa de salida	$W_s^{salida*} = W_s^{salida} - 2\alpha\delta_s^{salida}$
6 (z-1)	Ajuste del peso para una neurona r de la última capa oculta l	$W_r^l* = W_r^l - 2\alpha\delta_r^l$
⋮	⋮	⋮
6 (b)	Ajuste del peso para una neurona k de la 2ª capa oculta	$W_k^2* = W_k^2 - 2\alpha\delta_k^2$
6 (a)	Ajuste del peso para una neurona j de la 1ª capa oculta	$W_j^1* = W_j^1 - 2\alpha\delta_j^1 E_{ij}^1$
7 (z)	Ajuste de la ganancia para una neurona s de la capa de salida	$b_s^{salida*} = b_s^{salida} - 2\alpha\delta_s^{salida}$
7 (z-1)	Ajuste de la ganancia para una neurona r de la última capa oculta l	$b_r^l* = b_r^l - 2\alpha\delta_r^l$
⋮	⋮	⋮
7 (b)	Ajuste de la ganancia para una neurona k de la 2ª capa oculta	$b_k^2* = b_k^2 - 2\alpha\delta_k^2$
7 (a)	Ajuste de la ganancia para una neurona j de la 1ª capa oculta	$b_j^1* = b_j^1 - 2\alpha\delta_j^1$
8	Se repiten los pasos de 3 a 7, tantas iteraciones como sean necesarias para reducir el error en la salida	$e_m^2 = \sum_{i=1}^z (s_{si}^{salida} - a_{si}^{salida})$

Un problema que presenta cualquier procedimiento de entrenamiento es que el haber reducido el error en un cierto número de iteraciones y que este se mantenga constante no garantiza el haber encontrado el mínimo global, puesto que el algoritmo podría llevar al proceso a quedar atrapado en un mínimo local, aún cuando el número de iteraciones continuara creciendo, tal como se observa en la figura III.6.

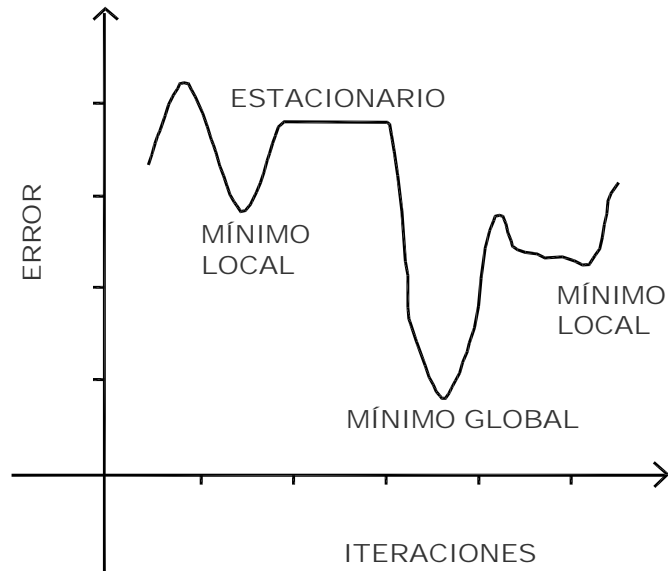


Figura III.6 Función de error (ref. 27)

### III.2 Modelo Neuronal Propuesto

El método alterno neuronal que se propone parte de la base de que la duración de la fase intensa, de un registro sísmico, es función de cuatro parámetros: la magnitud del sismo ( $M$ ), la distancia epicentral ( $D_e$ ), el azimut ( $A_z$ ) entre el epicentro y el punto de registro y finalmente del periodo fundamental de sitio ( $T_s$ ) en donde se ubica la estación de registro sísmico. Una vez establecido lo anterior se siguió la metodología siguiente:

**Selección de datos.** De acuerdo con los registros presentados en la tabla I.2 se realizó una primera selección desechando aquellos que mediante una simple

inspección visual se catalogan como incompletos y por otra parte aquellos que presentan baja relación señal-ruido (figura III.7).

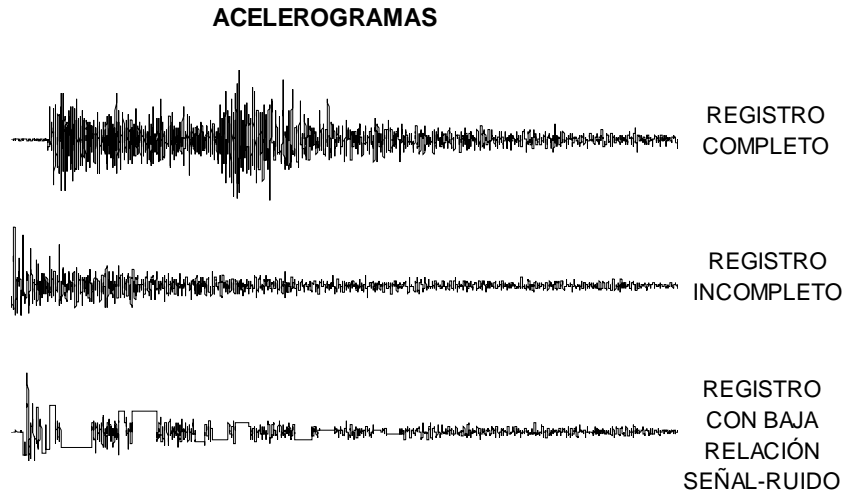


Figura III.7 Tipos de registros obtenidos para las estaciones sísmicas

**Integración de conjuntos de entrenamiento y prueba.** Se decidió elaborar redes por estación para homogenizar en ellas las condiciones geotécnicas del subsuelo, caracterizada por  $T_s$ , volviéndose esta irrelevante en el diseño, quedando los vectores, de entradas y salida integrados en la tabla III.2. Como las estaciones OXBJ y OXCU no cuentan con suficientes registros para entrenar, se decidió no incluirlos en la elaboración de las RNA's.

Tabla III.2 Matriz de datos usados para entrenar una red neuronal

ENTRADAS			SALIDA
Mmax	De (Km)	Az (°)	$t_d$ (s)
$M_1$	$De_1$	$Az_1$	$t_{d1}$
$M_2$	$De_2$	$Az_2$	$t_{d2}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$M_n$	$De_n$	$Az_n$	$t_{dn}$

Posteriormente se integraron en dos grupos: el de entrenamiento y el de prueba, el primero debe tener suficientes registros para entrenar adecuadamente a la red y el

segundo incluye registros que se encuentran en el umbral de valores del universo de datos de entrenamiento, es decir los que presentan mayor amplitud. Se tomaron siete registros de prueba para la estación OAXM, cinco para OXLC, siete para OXAL, cinco para OXPM y cinco para OXTO.

Los pesos y ganancias calculados durante el entrenamiento son usados para determinar las salidas, considerando siempre que los datos de prueba son desconocidos para la red diseñada, por eso cuando se acepta que el entrenamiento es bueno es porque se ha corroborado que la RNA predice adecuadamente los valores de prueba.

Como para cada evento sísmico existen tres registros obtenidos, en direcciones ortogonales, y cada uno de ellos tiene una  $t_d$  particular, se entrenó una red para cada dirección, por lo que se tienen quince redes diseñadas. La tabla III.3 muestra, junto a los registros seleccionados de entrenamiento y prueba, para cada estación, en cada dirección, los valores de la  $t_d$ , proporcionada por el criterio de Arias y calculada para los límites 2.5 y 97.5 por ciento. Lo anterior tuvo la finalidad de comparar con las estimaciones proporcionadas por la ecuación II. 3 ya que en diversas zonas de la ciudad de México las amplitudes del movimiento sísmico se atenúan lentamente lo que produce que la coda se incremente significativamente.

Tabla III.3 Registros y valores de la  $t_d$ , para cada dirección, utilizados en el entrenamiento y prueba de las RNA's diseñadas

Estación	Fecha	td (s)			Fecha	td (s)			
		EW	NS	V		EW	NS	V	
<b>ENTRENAMIENTO (29 REGISTROS)</b>									
OAXM	197308281	24	24	30	200208051	40	35	41	
	197811291	8	9	9	200212291	41	40	40	
	198206072	33	33	37	200401131	28	28	29	
	198301241	41	43	48	200401132	20	22	26	
	199407041	17	15	19	200401171	35	29	36	
	199408271	14	14	18	200402101	25	27	26	
	199408281	16	16	19	200402181	17	17	14	
	199509141	35	39	38	200404201	48	48	48	
	199604011	10	11	12	200406141	36	34	37	
	199802031	32	33	34	200408011	29	26	28	
	199805021	9	9	10	<b>PRUEBA (7 REGISTROS)</b>				
	199906152	12	11	14	198010241	19	22	22	
	199911061	11	11	14	199906151	42	38	46	
	200003011	8	10	14	199909301	26	28	32	
	200005101	10	11	11	200110031	14	13	15	
	200201301	40	40	38	200208271	28	24	31	
	200206071	32	34	37	200408071	42	35	39	
	200206072	29	27	33	200408181	23	21	32	
	200206181	8	19	23					
	<b>ENTRENAMIENTO (13 REGISTROS)</b>								
OXAL	199910071	25	26	25	200404201	48	49	49	
	199911061	32	30	29	200406141	33	35	35	
	199911101	17	20	25	200408011	24	30	36	
	200206072	26	31	31	<b>PRUEBA (5 REGISTROS)</b>				
	200312011	29	28	29	200109081	30	28	32	
	200401131	30	30	28	200110031	15	13	14	
	200401132	29	29	28	200208271	20	25	28	
	200401171	38	35	35	200408071	41	40	42	
	200402101	23	29	27	200408181	30	27	37	
	200402181	12	10	10					
	<b>ENTRENAMIENTO (15 REGISTROS)</b>								
	OXLC	199906152	27	28	28	200401132	25	35	35
		199911061	24	24	25	200401171	34	35	36
200001191		21	27	22	200402181	17	15	11	
200003011		21	29	32	<b>PRUEBA (7 REGISTROS)</b>				
200003121		37	41	37	199906151	54	52	65	
200009291		18	28	29	199909301	37	41	43	
200201161		42	45	52	200109081	21	23	33	
200201301		41	41	38	200110031	13	15	13	
200206072		23	29	34	200208271	25	32	35	
200208051		34	37	41	200408071	42	42	42	
200301221		48	37	42	200408181	21	27	36	
200401131		29	37	34					

Tabla III.3 (Continuación)

Estación	Fecha	td (s)			Fecha	td (s)						
		EW	NS	V		EW	NS	V				
<b>ENTRENAMIENTO (21 REGISTROS)</b>												
OXPM	199911061	30	31	33	200312011	28	28	32				
	199911101	41	46	49	200401131	32	27	32				
	199912171	26	30	38	200401132	33	29	35				
	200001191	26	32	31	200401171	34	35	34				
	200003011	27	30	34	200402181	15	16	12				
	200005101	32	33	36	200404201	48	48	47				
	200009291	30	29	34	200406141	38	32	41				
	200111101	43	36	44	<b>PRUEBA (5 REGISTROS)</b>							
	200201161	36	38	46								
	200201301	39	37	34					200109081	19	15	29
	200205111	33	30	32					200110031	15	16	16
	200206072	32	29	35					200208271	30	23	36
	200208051	38	38	41	200408071	42	32	40				
	200212291	41	43	41	200408181	25	21	34				
	<b>ENTRENAMIENTO (45 REGISTROS)</b>											
OXTO	199910071	27	26	25	200208051	41	41	45				
	199910251	38	27	37	200211081	38	37	42				
	199911061	28	24	29	200212021	27	33	32				
	199911101	14	20	26	200212291	42	43	42				
	199911291	45	45	43	200302011	29	27	53				
	199912171	21	20	32	200306131	18	16	25				
	200001191	30	28	30	200307081	45	45	38				
	200003011	29	17	29	200309251	41	40	42				
	200003121	48	44	43	200312011	25	31	39				
	200005101	21	31	31	200401131	27	28	37				
	200007211	42	35	57	200401132	23	23	34				
	200008171	22	26	27	200401141	29	33	32				
	200009291	23	32	36	200401171	31	31	36				
	200010171	27	29	34	200402101	26	32	43				
	200101261	40	36	41	200402181	22	18	17				
	200102191	21	32	37	200404201	50	52	48				
	200102201	14	15	29	200405061	22	26	30				
	200111101	38	36	43	200406141	38	38	41				
	200111281	42	42	54	200408011	33	33	33				
	200201161	38	37	53	<b>PRUEBA (5 REGISTROS)</b>							
	200201301	42	45	40								
	200202261	44	48	52					200109081	19	18	25
	200205111	32	36	35					200110031	19	18	15
	200206071	33	39	39					200208271	27	30	32
	200206072	27	38	32	200408071	48	43	45				
	200206111	53	52	43	200408181	34	32	41				

**Arquitecturas elaboradas.** Las que han generado mejores resultados tienen una o dos capas ocultas, sin comunicación lateral. La tabla III.4 muestra las arquitecturas de las redes de la forma: entradas x primera capa oculta x segunda capa oculta x salida, para cada dirección y estación. En cierto número de iteraciones, utilizando el programa **Thinks Pro** (ref. 28) que grafica la superficie error en tiempo real, y por experiencia se fija un mínimo, el cual se decide que es el mínimo global, el procedimiento es heurístico y depende de la habilidad de quien programa y del conocimiento del fenómeno a modelar.

Tabla III.4 Arquitecturas de las redes neuronales, incluyendo número de iteraciones

Estación	Componente	Arreglo RNA	Iteraciones
		E x O x O x S	
OAXM	EO	3X50X40X1	900
	NS	3X07X05X1	1200
	V	3X30X15X1	720
OXAL	EO	3X50X30X1	559
	NS	3X60X30X1	453
	V	3X90X1	567
OXLC	EO	3X50X1	1794
	NS	3X08X1	1175
	V	3X40X1	273
OXPM	EO	3X50X40X1	1007
	NS	3X55X45X1	1043
	V	3X50X40X1	1011
OXTO	EO	3X20X1	2317
	NS	3X10X1	1613
	V	3X50X40X1	613

**Características de las RNA's.** Para las capas ocultas se utilizó la función de transferencia sigmoidea, y para la de salida la lineal, que es la mejor decisión cuando se trata de un proceso de MAX MIN (ref. 29). La regla de aprendizaje utilizada es de retropropagación, y la arquitectura de aprendizaje progresivo de múltiples capas.

Finalmente se obtienen los resultados de entrenamiento y prueba, en la salida de las redes, y se juzga a la red como bien entrenada, si es el caso. En caso contrario se debe proponer nuevas arquitecturas u otro número de iteraciones. Puede ser que los mínimos encontrados sean mínimos locales, so pena que así sea se debe revisar que tan eficiente resulta el entrenamiento a través de las pruebas.



#### IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El diseño de las RNA's y la selección de los parámetros de entrenamiento se realizaron con la filosofía de que estas tuvieran capacidad predictiva ante eventos no utilizados durante el entrenamiento o ante aquellos que aún no han ocurrido pero que tienen el potencial para ello, o bien, otros que se sabe ocurrieron pero que no fueron registrados.

Una cuestión que se presentan con una red entrenada es que a pesar de la experiencia del diseñador, nunca se tendrá la seguridad absoluta de que se alcanzó el error mínimo global, o sea que es la mejor red que pueda entrenarse para resolver el problema. Sin embargo, si el error encontrado se mantiene constante o disminuye muy poco y los resultados del conjunto de prueba presentan alta correlación con los reales, se puede tener la confianza de que la red está aceptablemente bien entrenada y con posibilidades de generalización a partir de los patrones que se le presentaron.

Para evaluar visualmente los resultados obtenidos se incluyen las figuras IV.1 a IV.5 para las cinco estaciones, las cuales indican que tan bien se entrenaron las redes, cuan capaces son de reconocer las las relaciones entre los parámetros de entrada para determinar el valor  $t_d$ , y si el universo de datos de entrenamiento es suficiente para modelar el fenómeno. Por cada figura se muestran tres gráficos, para las componentes EW, NS y V respectivamente, en cuadrículas se muestran los resultados que se obtuvieron en la etapa de entrenamiento, una red perfectamente entrenada debe igualarlas con una recta a 45 grados, mientras que con círculos se muestran los resultados obtenidos en las pruebas. En el eje de las abscisas se encuentran los valores de la  $t_d$  según el procedimiento de Arias, mientras que en el de las ordenadas los obtenidos con el método alterno neuronal propuesto.

Salvo las direcciones EW y V de las estaciones OXPM y OXTO, los entrenamientos y pruebas son buenos, incluso en estaciones como OAXM y OXLC el entrenamiento es óptimo y el valor resultante es aceptable.

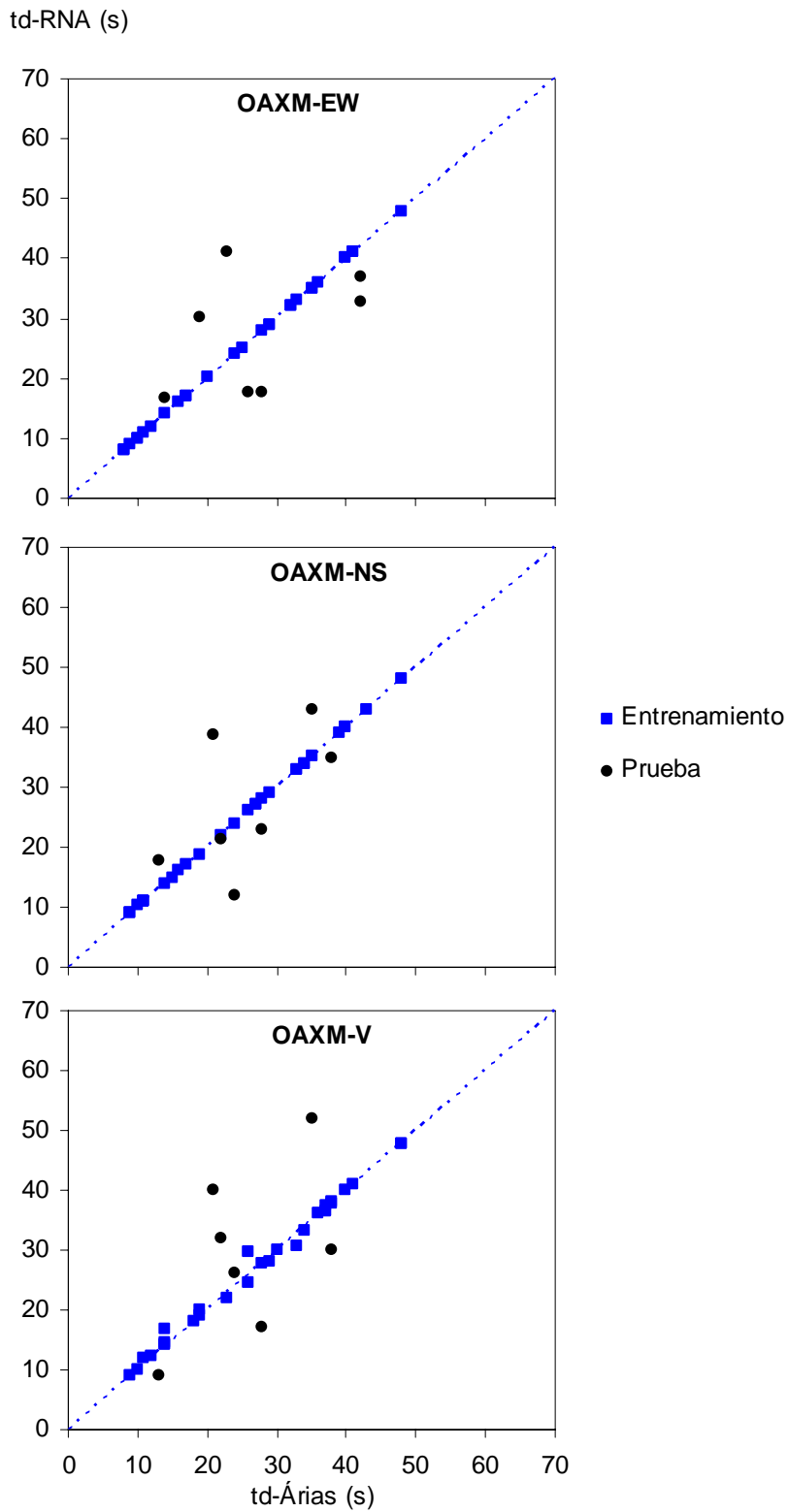


Figura IV.1 Resultados de entrenamiento y prueba, OAXM

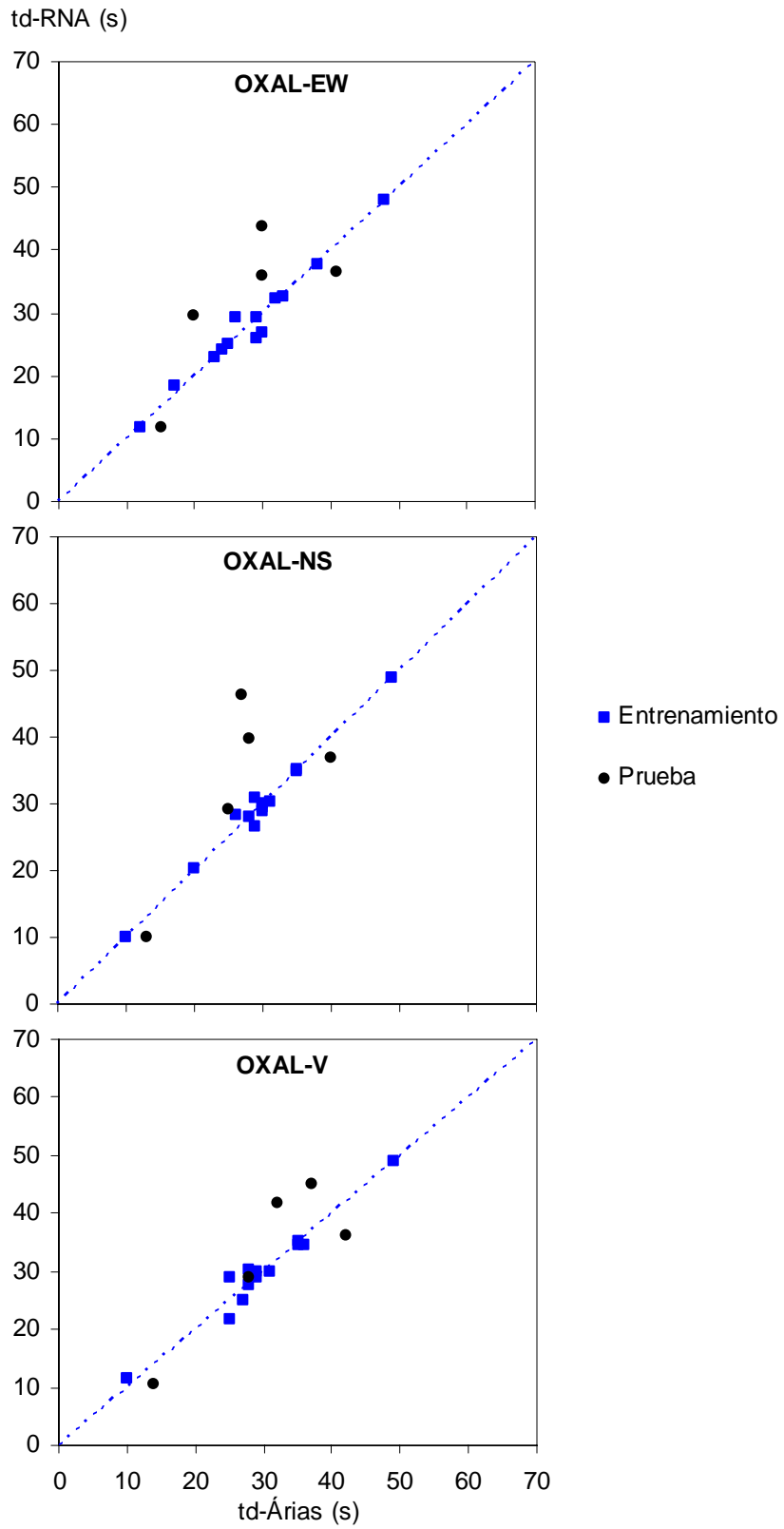


Figura IV.2 Resultados de entrenamiento y prueba, OXAL

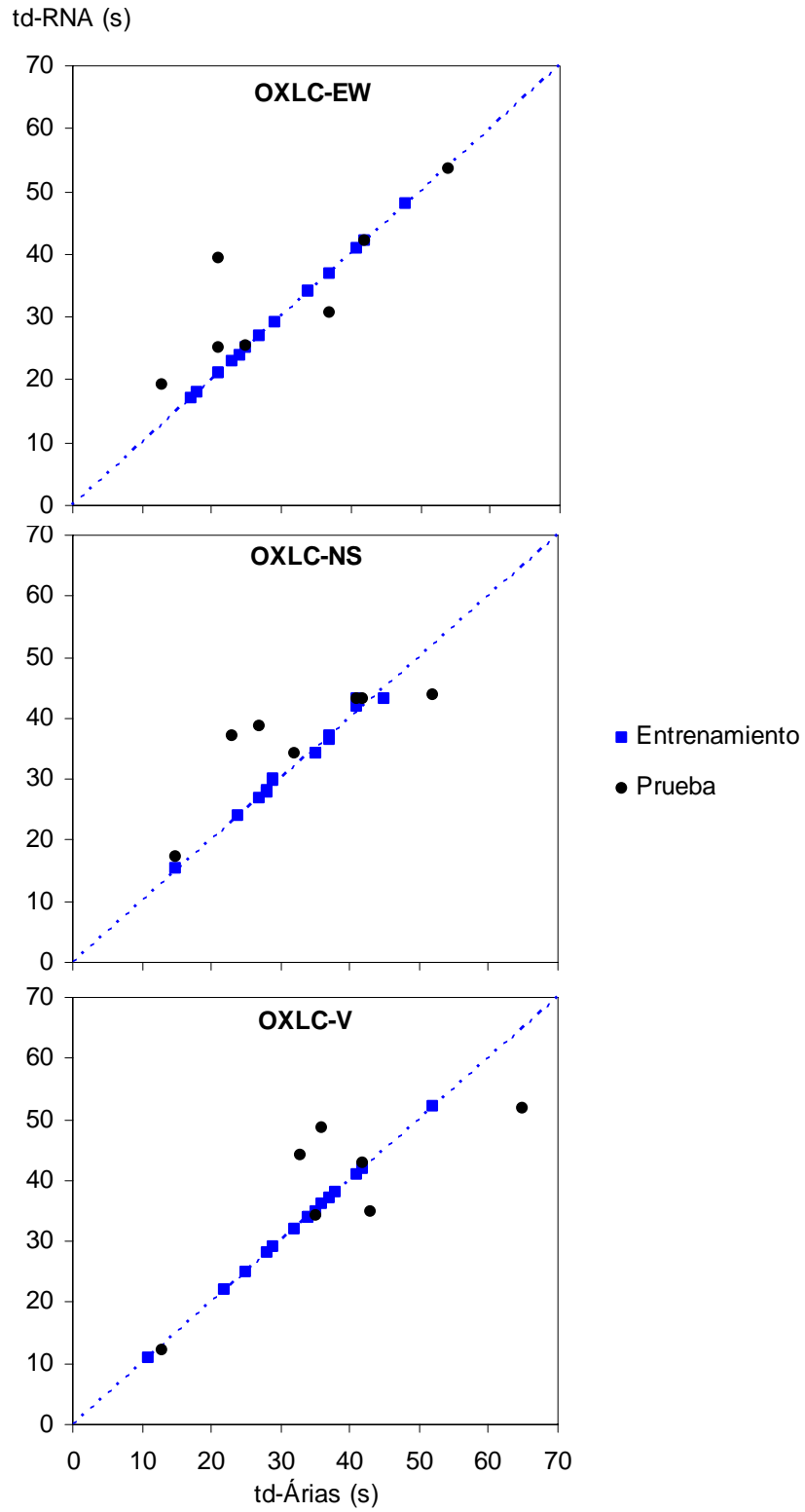


Figura IV.3 Resultados de entrenamiento y prueba, OXLC

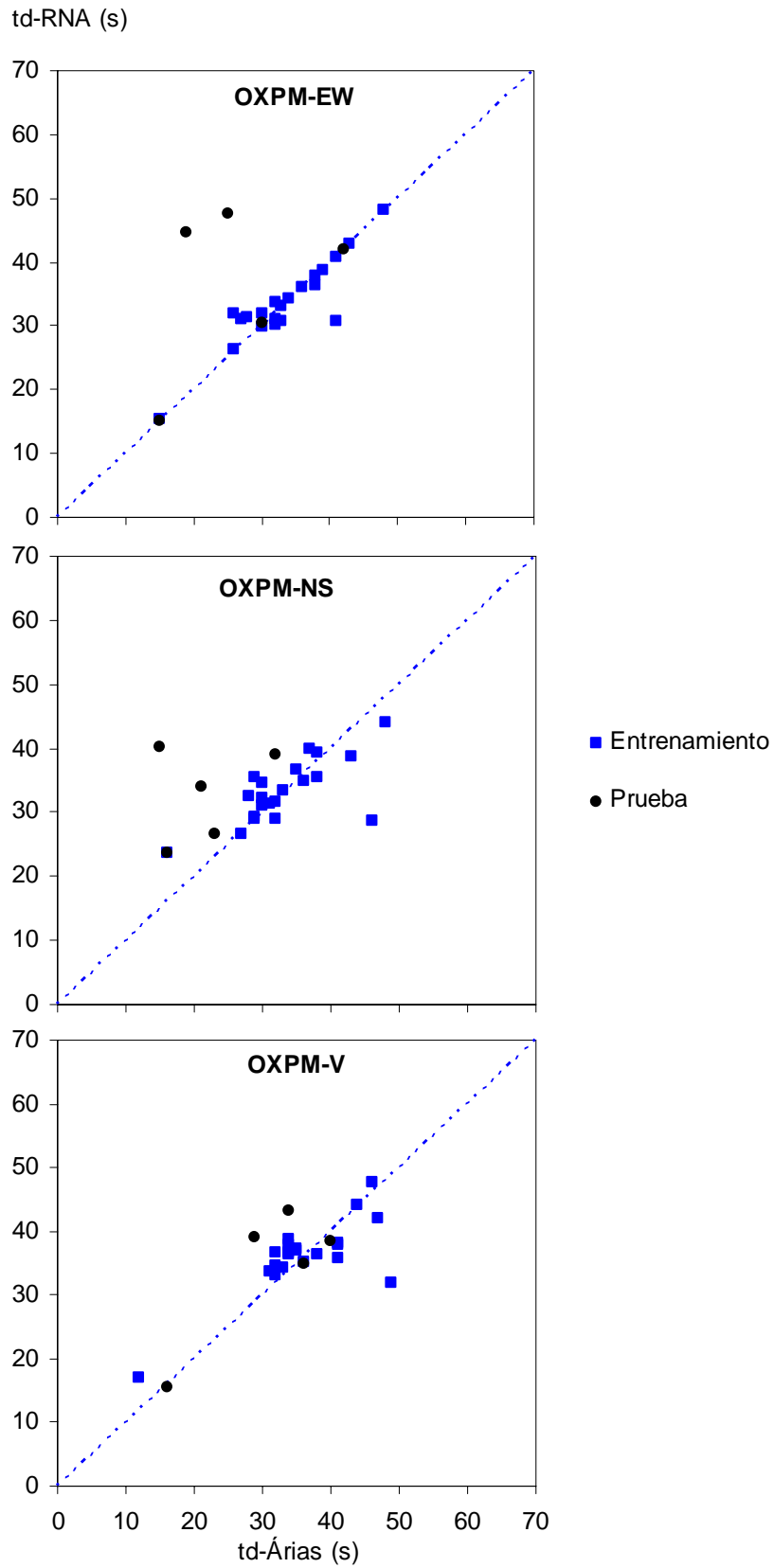


Figura IV.4 Resultados de entrenamiento y prueba, OXPM

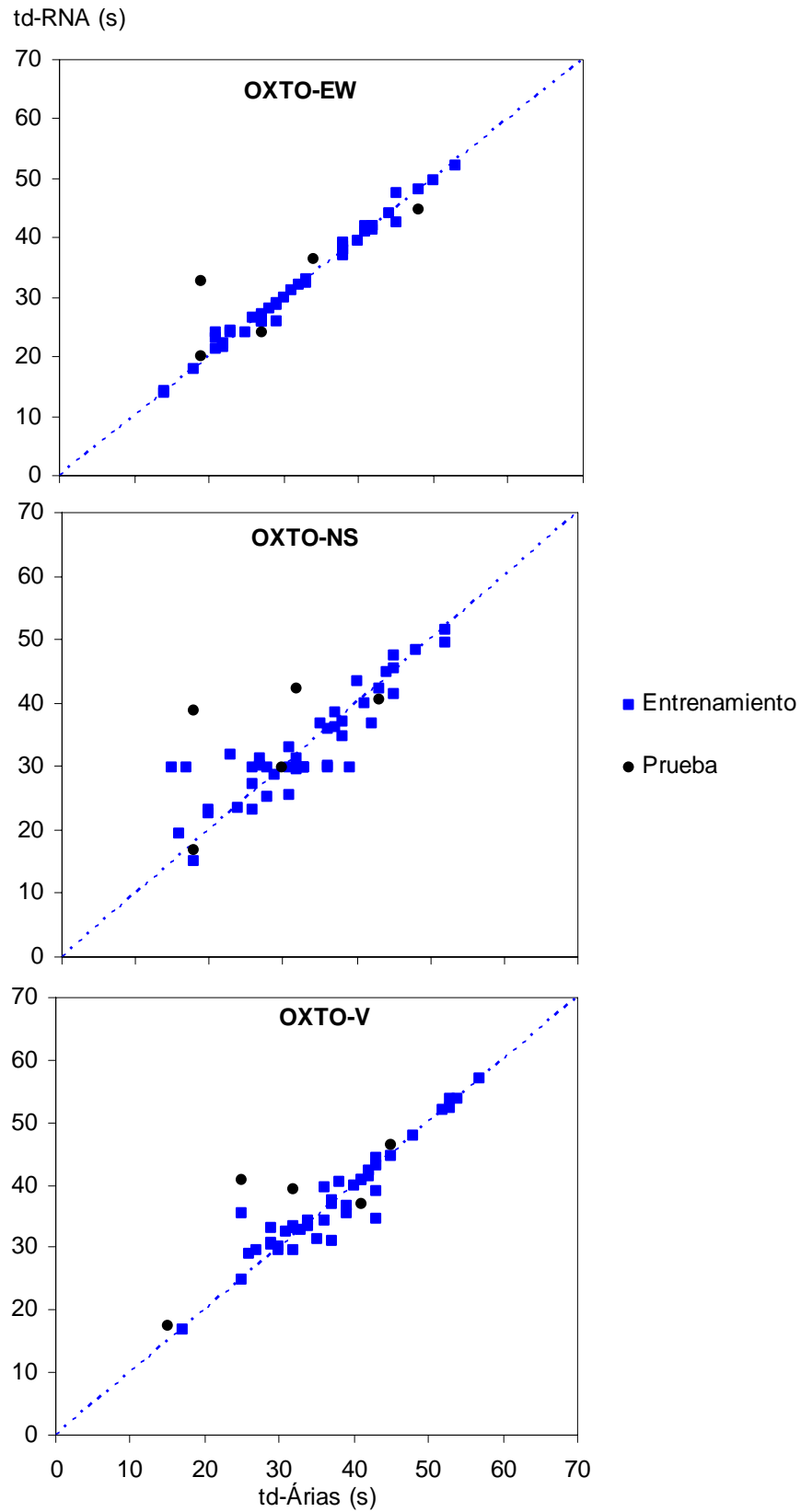


Figura IV.5 Resultados de entrenamiento y prueba, OXTO

La tabla IV.1 muestra los resultados obtenidos mediante el procedimiento de Arias, las RNA's y la ecuación II.3, para las 5 estaciones en sus 3 direcciones.

Tabla IV.1 Comparación de resultados Arias-RNA-Ec.

Fecha del Sismo	$t_d$ (s)								
	EW			NS			V		
	Arias	RNA	Ec.	Arias	RNA	Ec.	Arias	RNA	Ec.
<b>OAXM</b>									
198010241	19	30	47	22	21	47	22	32	47
199906151	42	33	38	38	35	38	46	30	38
199909301	26	18	46	28	23	46	32	17	46
200110031	14	17	2	13	18	2	15	9	2
200208271	28	18	17	24	12	17	31	26	17
200408071	42	37	18	35	43	18	39	52	18
200408181	23	41	28	21	39	28	32	40	28
<b>OXAL</b>									
200109081	30	36	21	28	40	21	32	42	21
200110031	15	12	2	13	10	2	14	10	2
200208271	20	30	16	25	29	16	28	29	16
200408071	41	37	18	40	37	18	42	36	18
200408181	30	44	28	27	46	28	37	45	28
<b>OXLC</b>									
199906151	54	54	31	52	44	31	65	52	31
199909301	37	31	44	41	43	44	43	35	44
200109081	21	25	21	23	37	21	33	44	21
200110031	13	19	2	15	17	2	13	12	2
200208271	25	25	16	32	34	16	35	34	16
200408071	42	42	18	42	43	18	42	43	18
200408181	21	39	28	27	39	28	36	49	28
<b>OXPM</b>									
200109081	19	43	21	15	41	21	29	42	21
200110031	15	13	2	16	14	2	16	11	2
200208271	30	28	16	23	29	16	36	34	16
200408071	42	42	18	32	36	18	40	38	18
200408181	25	52	28	21	38	28	34	47	28
<b>OXTO</b>									
200109081	19	33	22	18	39	22	25	41	22
200110031	19	20	2	18	17	2	15	18	2
200208271	27	24	16	30	30	16	32	39	16
200408071	48	45	18	43	40	18	45	46	18
200408181	34	36	29	32	42	29	41	37	29

Por otra parte, en las figuras IV.6 a IV.10 se presenta en forma gráfica lo resumido en la tabla IV.1 pues así se aprecia mejor que el método neuronal propuesto para determinar la  $t_d$  es aceptable y que puede utilizarse de forma confiable, en el caso de que no se cuente con los registros.

Salvo los resultados de OAXM, los valores estimados con la ecuación siempre son menores al valor correcto de la  $t_d$  mientras que los de las RNA's se ajustan mejor. También, el promedio de la diferencia absoluta máxima que existe entre el método de Arias y el de la red entrenada es siempre menor que el que existe entre el primero con la ecuación de Reynoso y Ordaz, y con la premisa de que una red queda mejor entrenada en cuanto se cuente con un conjunto de registros que represente mejor al fenómeno, y por consiguiente hará que la diferencia en el cálculo de la  $t_d$  sea menor.

Las ecuaciones existentes, como es el caso de la propuesta por Reynoso y Ordaz, están en función de parámetros ajenos a la disposición del registro, estas determinan un mismo valor de la  $t_d$  para las tres direcciones, por ejemplo, para el sismo del 3 de octubre de 2001 en las cinco estaciones, y las tres direcciones, el valor calculado con la ecuación II.3 es de 2 segundos, mientras que los arreglos de RNA's responden con mayor acercamiento al valor correcto. También, vale la pena revisar el sismo del 30 de septiembre de 1999, que para el caso de la estación OAXM, la ecuación determina casi 20 segundos de más sobre la duración correcta, en cambio las redes diseñadas, para dicha estación, calculan duraciones como 10 segundos menor que las duraciones correctas. No así para la estación OXLC, donde ambos métodos se acercan al valor correcto.



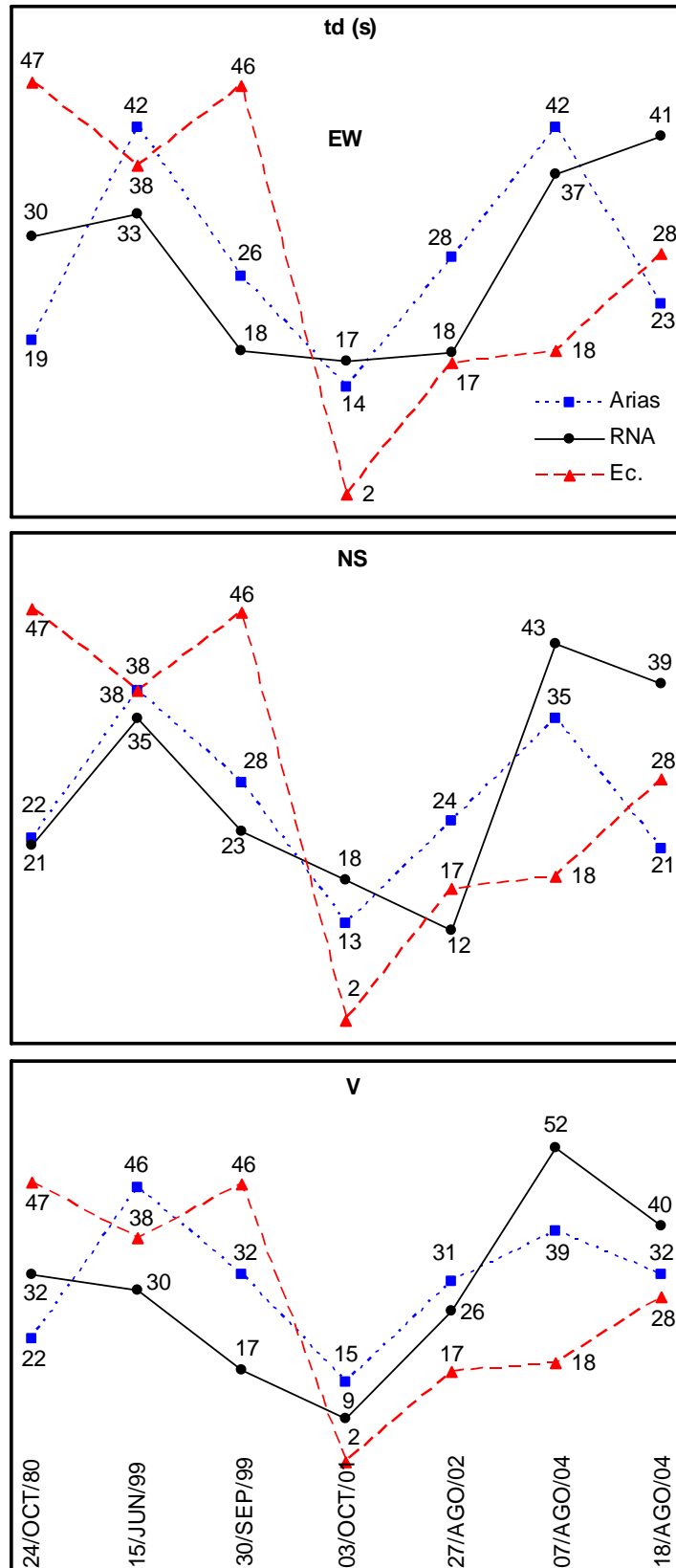


Figura IV.6 Comparación de resultados obtenidos para OAXM

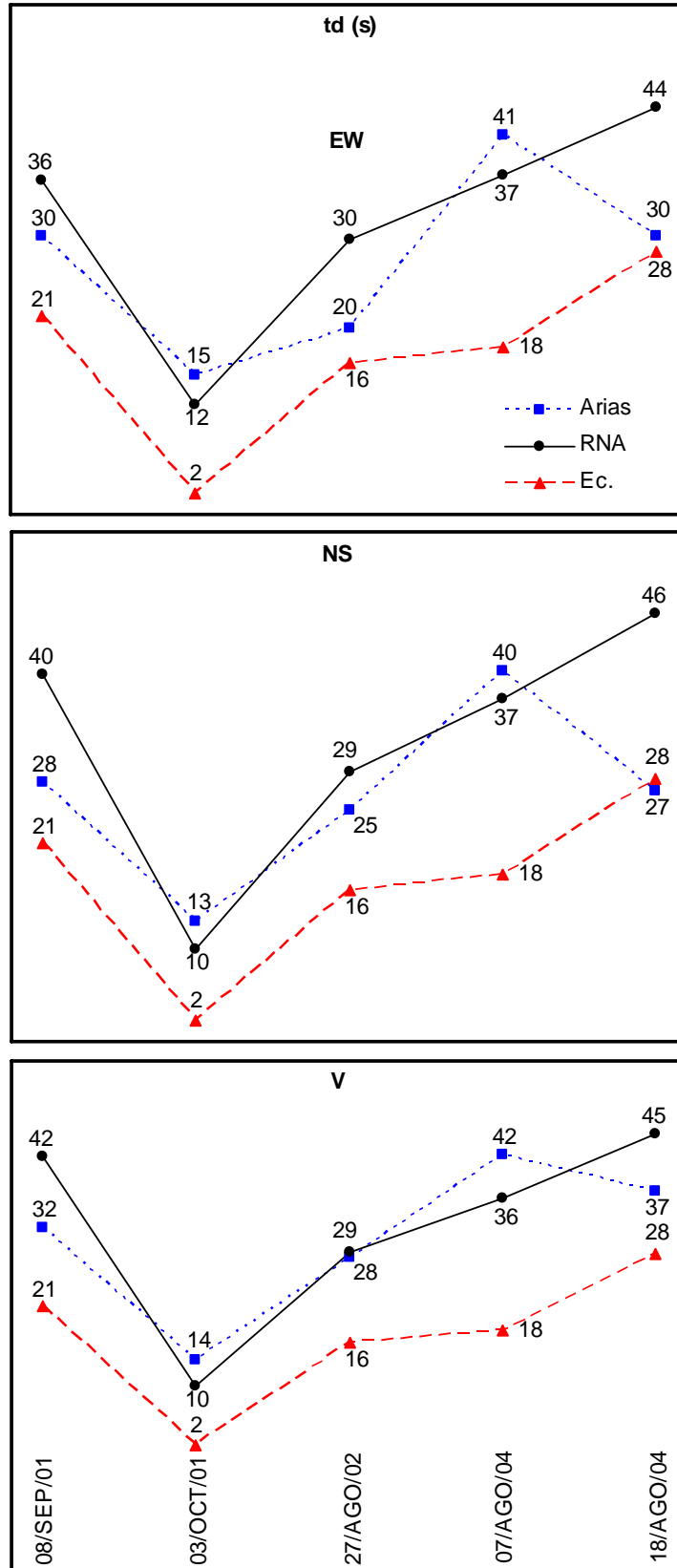


Figura IV.7 Comparación de resultados obtenidos para OXAL

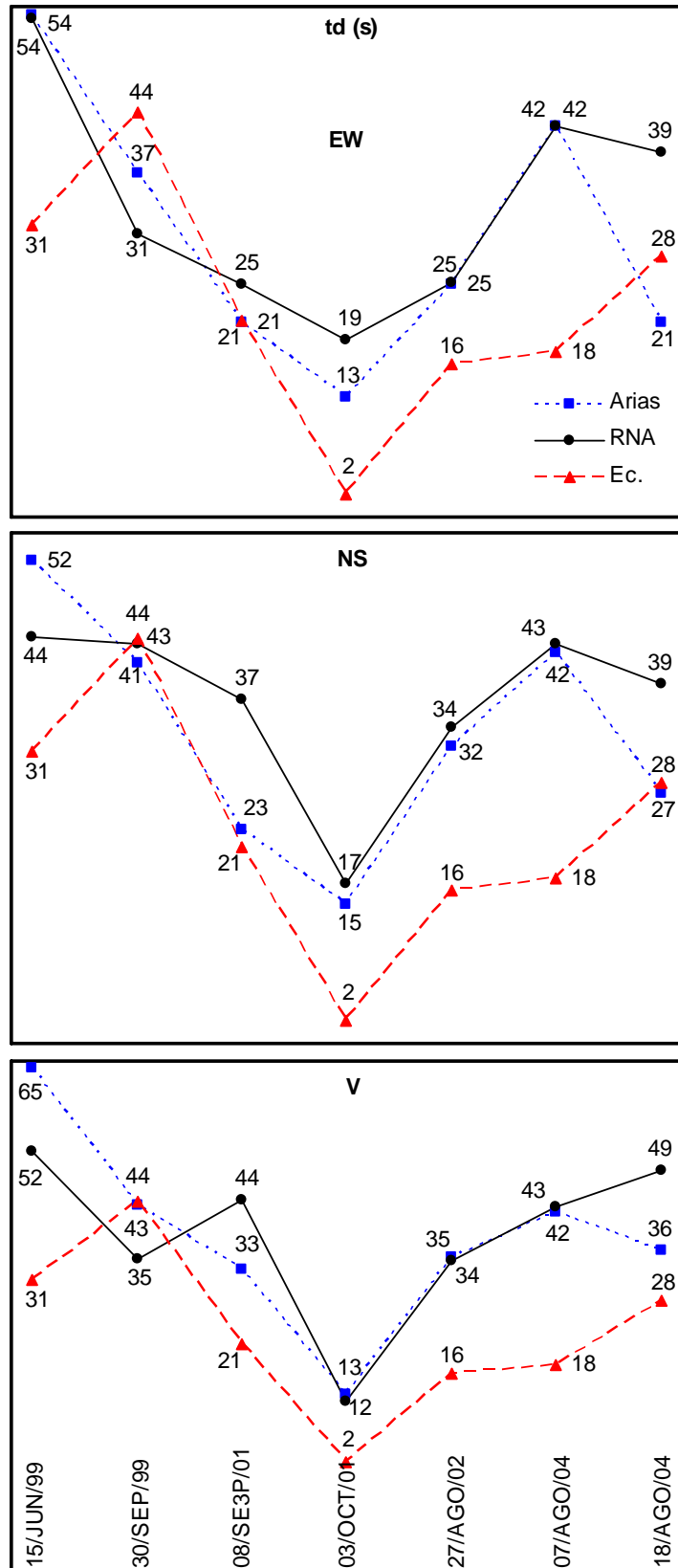


Figura IV.8 Comparación de resultados obtenidos para OXLC

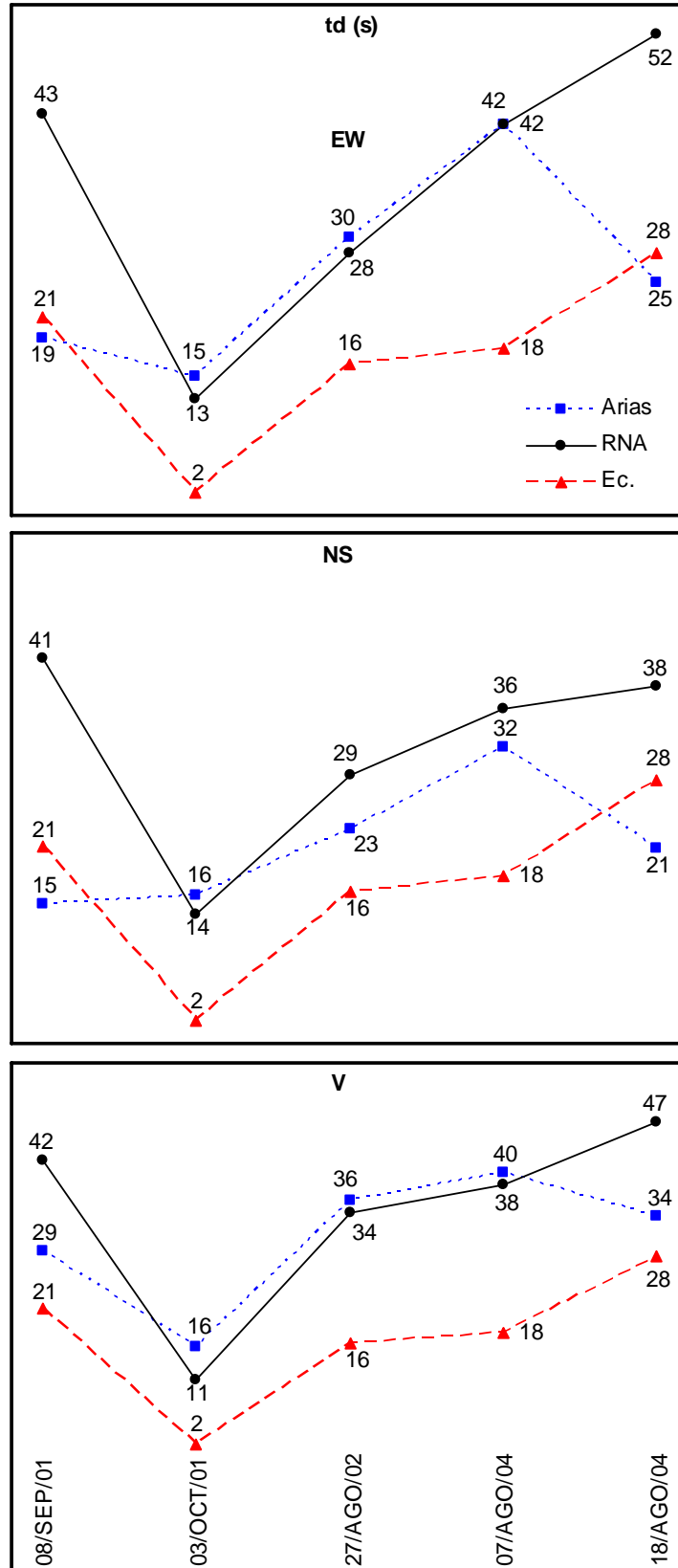


Figura IV.9 Comparación de resultados obtenidos para OXPM

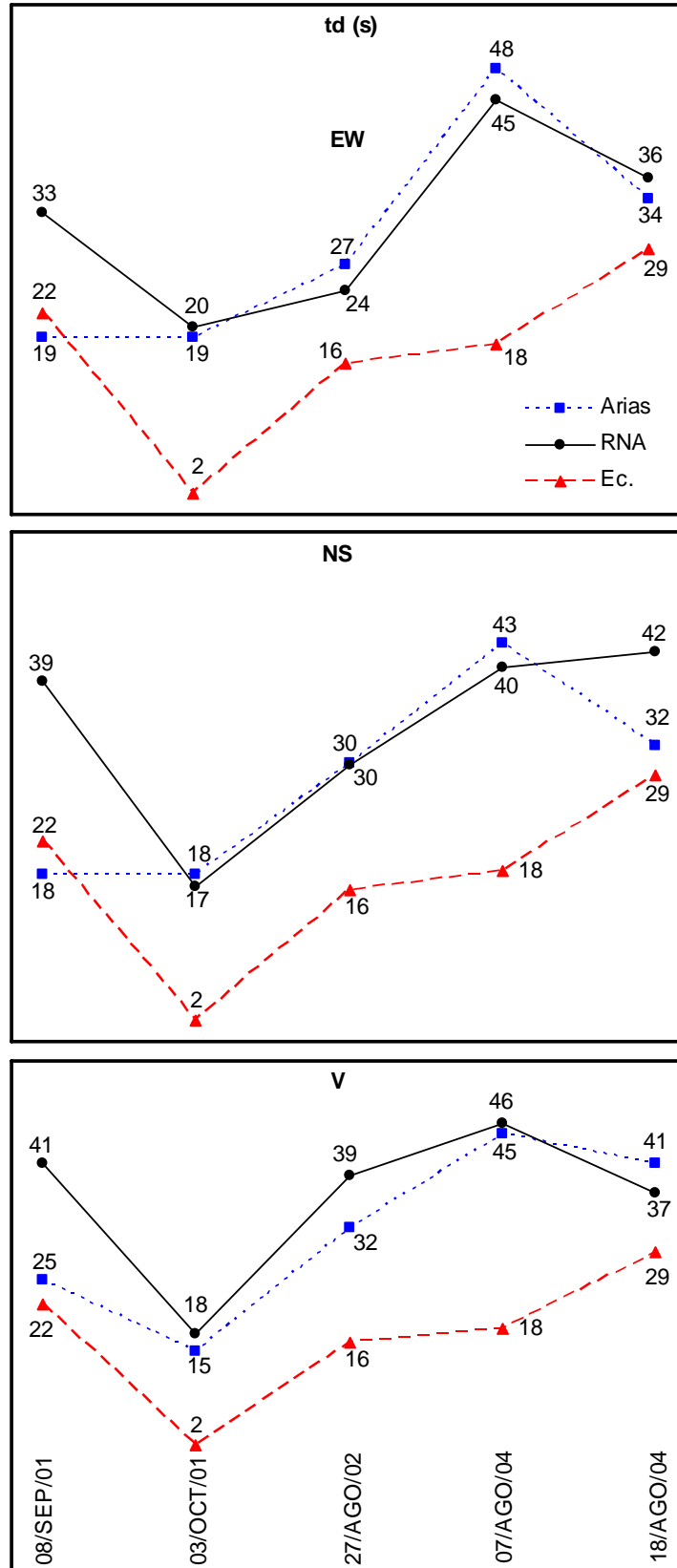


Figura IV.10 Comparación de resultados obtenidos para OXTO

## CONCLUSIONES

- Se contó con un banco de datos acelerográficos de 67 registros de las siete estaciones de la Red Acelerográfica de la Ciudad de Oaxaca que opera el II-UNAM. Se desecharon dos estaciones por que contaban con pocos registros, los cuales resultan insuficientes para entrenar una red neuronal artificial. A continuación se decidió separar registros relevantes para usarlos como prueba de la efectividad del método propuesto, después se diseñaron las redes y se entrenaron a través de un algoritmo definido. Finalmente, se probaron con los datos desconocidos para la red, obteniendo resultados.
- Las RNA's, diseñadas para esta tesis, toman en consideración los parámetros magnitud, distancia epicentral y el azimut. No se ha considerado el periodo del suelo porque al ser todos los registros de una misma estación se tienen iguales condiciones geotécnicas del subsuelo y el parámetro periodo del suelo se vuelve constante e irrelevante en el diseño de las RNA's.
- Las ecuaciones existentes, como es el caso de la propuesta por Reynoso y Ordaz, están en función de parámetros ajenos a la disposición del registro y determinan un mismo valor de la  $t_d$  para las tres direcciones mientras que los arreglos de RNA's responden con mayor acercamiento al valor correcto, no así para la estación OXLC, donde ambos métodos se acercan al valor correcto. Salvo las direcciones EW y V de las estaciones OXPM y OXTO, los entrenamientos y pruebas son buenos, incluso en estaciones como OAXM y OXLC el entrenamiento es óptimo y el valor resultante es aceptable, también, exceptuando los resultados de OAXM, los valores estimados con la ecuación siempre son menores al valor correcto de la  $t_d$  mientras que los de las RNA's se ajustan mejor y el promedio de la diferencia absoluta máxima que existe entre el método de Arias y el de la red entrenada es siempre menor que el que existe entre el primero con la ecuación II.3.
- Considerando que el fenómeno está bien caracterizado por los elementos de la capa de entrada y que el conjunto de datos para entrenamiento es robusto, se presentan tres tipos de problemas al entrenar una RNA. El primero es que la matriz no aprenda, es decir que la regresión no converge y el error en vez de disminuir, aumenta, a esto se le llama sub-aprendizaje y podría ser solucionado cambiando la

arquitectura de la red. El segundo es que la matriz converge hasta llegar a un cierto número de iteraciones y después de eso el resultado se desvía de los valores reales de manera importante, a esto se le conoce como sobre-aprendizaje y la solución podría ser detener el proceso y tomar los valores de los pesos y ganancias de todos los elementos de la red que hacen que el error sea mínimo. El tercer problema que se presenta es que el error no logre disminuir lo suficiente y los resultados del entrenamiento difieran significativamente de la salida deseada, esto es debido a que la red diseñada no tiene la suficiente capacidad para relacionar las entradas con la(s) salida(s) y aquí, definitivamente debe cambiarse la arquitectura de la red.

- Es absolutamente necesario que se tenga un universo de datos suficiente en la matriz de entrenamiento de las RNA's, pues el aprendizaje de la red tiene relación con él. En consecuencia, una RNA que carezca de una matriz de entrenamiento robusta, presentará problemas en el aprendizaje. Aunado a esto hay que decir que por ser un procedimiento heurístico es difícil saber cuantos elementos como mínimo deben entrenar a la red y la única herramienta para juzgar son los resultados del entrenamiento y de las pruebas hechas.
- Otra de las cuestiones que se presentan con una RNA entrenada es que a pesar de la experiencia del diseñador, nunca se tendrá seguridad absoluta de que esta alcanzó el error mínimo global, o sea que es la mejor red que pueda entrenarse para resolver el problema. Sin embargo, si el error encontrado se mantiene constante o disminuye muy poco y los resultados del conjunto de prueba presenta alta correlación con los reales se puede tener confianza en que la red está bien entrenada y con posibilidades de generalización a partir de los patrones de entrenamiento.
- Existen varias definiciones de lo que es la duración de la fase intensa del movimiento sísmico, entre las que se encuentra la propuesta por Arias, la cual requiere de un registro de aceleraciones para su estimación. Cuando no existe este, como es el caso de sismos no registrados ó cuando se desea establecer una posible duración de la fase intensa en un lugar donde es probable que ocurra tal sismo se pueden utilizar algunos otros métodos como el de las RNA's propuesta con capacidad predictiva.

---

## REFERENCIAS

1. H Takeuchi, S Uyeda y H Kanamori. "¿Qué es la Tierra?, El problema de la deriva continental", ed. Orbis, México (1987)
2. G Tolson, "La Teoría de la Tectónica de Placas y la Deriva Continental", Instituto de Geología, UNAM, México (1998)
3. J Minster y T Jordan, "Present-day plate motions", Geophysical Research Journal, USA (1978)
4. S Nishenko y S Singh, "Conditional Probabilities for the Recurrence of large and great interplate earthquakes along the Mexican subduction zone", BSSA, USA (1987)
5. V Kostoglodov y J Pacheco, "Cien años de Sismicidad en México" Instituto de Geofísica, UNAM, México (1999)
6. S Singh y M Ordaz, "Ciencias de la Tierra hoy", Fondo de Cultura Económica, México (1991)
7. G Suárez y Z Jiménez, "Sismos en la Ciudad de México y el terremoto de septiembre de 1985", Instituto de Geofísica, UNAM, México (1986)
8. A Nava, "Terremotos", Fondo de Cultura Económica, México (1987)
9. R Guerrero, "Duración del Movimiento Durante los Sismos", Tesis de Maestría, UNAM, México (1997)
10. L Alcántara, E Ovando y M Macías, "Un Método Neuronal Artificial para estimar la Duración de la Fase Intensa del Movimiento Sísmico", XV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica SMIS, México (2005)
11. S Singh y G Suárez, "Review of the Seismicity of Mexico with Emphasis on the September 1985, Michoacan Earthquakes", American Society of Civil Engineers, USA (1991)



- 
12. G Carmona, "Red Acelerográfica de la Ciudad de Oaxaca", Tesis de Licenciatura, UNAM, México (2000)
  13. H Lira, "Aplicación de los Conocimientos de Ingeniería Civil en los Efectos de Sitio Observados en una Ciudad de Mediano Desarrollo ante Acción Sísmica", Tesis de Licenciatura, UNAM, México (2003)
  14. J Velasco, "Especificaciones Técnicas de los Equipos de Registro", Curso de Instrumentación Sísmica (Aplicaciones prácticas en las estructuras), CICM y SMIS, México (1997)
  15. *Ídem*
  16. *Ib. Ídem*
  17. A Mora, "La Amplificación del Movimiento Sísmico en el Subsuelo de la Ciudad de Oaxaca", Tesis de Licenciatura, UNAM, México (2006)
  18. L Alcántara, "La Base Mexicana de Sismos Fuertes. Un sistema de CD-ROM para la obtención de acelerogramas de 1960 a 1999", 2º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica, España (2001)
  19. R Guerrero (1997), *op. cit.*
  20. A Arias, "A Measure of Earthquake Intensity", Seismic Design of Nuclear Power Plants, ed. R Hansen, MIT Press, USA (1970)
  21. L Alcántara, E Ovando y M Macías, "Aplicación de un Método Neuronal Artificial para estimar la Fase Intensa del Movimiento Sísmico", II Congreso Latinoamericano de Sismología, Chile (2006)
  22. *Ídem*
  23. S Haykin, "Neural Networks. A comprehensive foundation", ed. Prentice Hall, USA (1970)
  24. *Ídem*
  25. *Ib. Ídem*

- 
26. R Lemus, "Redes Neurales, Una Visión Introdutoria", Depto. De Ing. Electrónica de la Universidad de El Salvador, El Salvador (1994)
  27. *Ídem*
  28. Logical Designs, "Thinks Pro, Neural Networks for Windows", User's guide, USA (1996)
  29. I Martínez, "Introducción a las Redes Neuronales", Tesis de Doctorado, España (2004)