

IV. ESTIMACIÓN DE LA ACELERACIÓN MÁXIMA UTILIZANDO EL MODELO NEURONAL ARTIFICIAL

IV. ESTIMACIÓN DE LA ACELERACIÓN MÁXIMA UTILIZANDO EL MODELO NEURONAL ARTIFICIAL

IV.1 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS

Se determinó que los parámetros que influyen en la estimación de la aceleración máxima del terreno son la magnitud del sismo (M), la distancia epicentral (De) y el azimut (Az). Estos tres parámetros se utilizaron como nodos de entrada en el modelo neuronal artificial y como único nodo de salida u objetivo la aceleración máxima del terreno (a_{Max}), enseguida se amplían dichos conceptos

La magnitud de un sismo es una escala, que representa la energía sísmica liberada por cada sismo; existen diversos tipos (ver Anexo), cada una con limitantes de aplicación si ciertas condiciones de registro y en el acelerógrafo se cumplen. En la práctica la magnitud de un temblor se define como el promedio de las magnitudes calculadas en tantas estaciones como sea posible. Para este modelo se utilizó el valor máximo de los reportados por el Servicio Sismológico Nacional, de manera que la red lo utilice como marcador de patrones de comportamiento.

La aceleración máxima del terreno, es la ordenada máxima absoluta del acelerograma de un sismo en particular.

La distancia epicentral, es la distancia que existe entre las coordenadas del epicentro de un sismo y las correspondientes a la estación que lo registró, tomando en cuenta la curvatura de la Tierra. El punto de origen dentro de la Tierra de donde proviene el movimiento y es la causa del sismo se denomina foco o hipocentro. El punto o área del planeta en donde más se sienten los efectos de las sacudidas y está encima del foco, se llama epicentro.

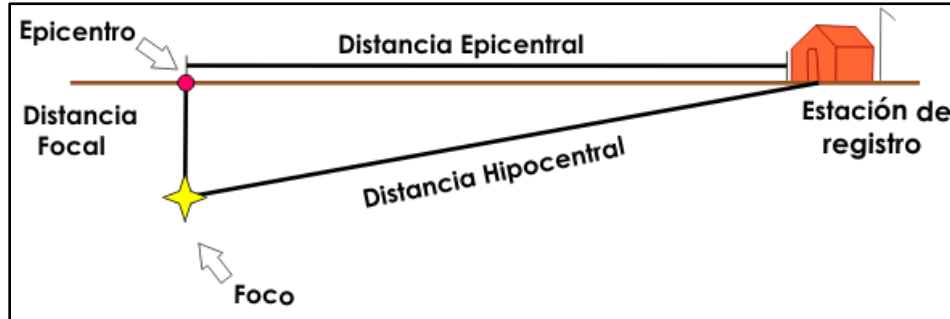


Figura IV.1 Distancia Epicentral

El valor del azimut, se toma como el ángulo que se forma entre el norte geográfico y el segmento dirigido que va del epicentro a la estación. Estos tres últimos parámetro se obtuvieron mediante el uso del programa Espectra (ref. 46).

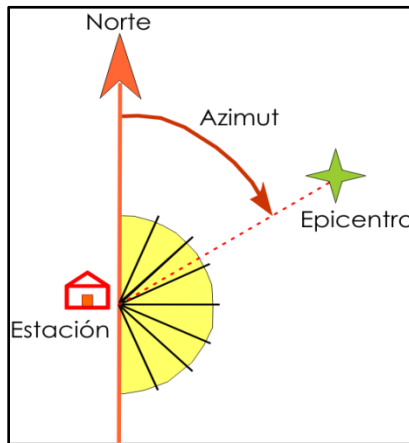


Figura IV.2 Azimut

IV.2 SELECCIÓN DE LA BASE DE DATOS SÍSMICOS

Para este modelo neuronal artificial se decidió trabajar con estaciones que fueran cercanas a la costa, que estuvieran desplantadas sobre roca y que además tuvieran un número considerable de registros; las estaciones que cuentan con estas características son Las Negras (LANE), Río Grande (RIOG) y Salina Cruz (SRCU).



Figura IV.3 Estaciones de estudio

En las tablas IV.1 a IV.3 se presenta la información correspondiente a los sismos utilizados en las etapas de prueba y entrenamiento de las RNA's. La fecha del sismo que está integrado por nueve números, los primeros cuatro de izquierda a derecha son el año, los siguientes dos son el mes y los últimos dígitos antes del punto decimal son el día, después del punto decimal está el número de evento registrado en esa fecha. Enseguida se indica la magnitud, la distancia epicentral y el azimut.

Para la estación LANE se contó con 46 sismos, para RIOG con 40 y para SCRU con 37.

Tabla IV.1 Sismos utilizados para la estación LANE

LANE									
No.	Sismo	M	De (km)	Az (°)	No.	Sismo	M	De (km)	Az (°)
1	19980303.1	5	81	108.36	24	20040113.2	5.7	6	41.38
2	19981121.1	4.5	52	88.59	25	20040113.3	4.1	6	142.37
3	19990113.1	4.5	16	2.64	26	20040114.1	4.6	9	357.9
4	19990615.1	7	249	351.77	27	20040210.1	4.4	12	353.38
5	19990828.1	4.5	25	248.46	28	20040303.1	4.8	52	197.34
6	19990930.1	7.6	16	89.27	29	20040614.1	6.4	108	285.62
7	19990930.3	4.2	26	299.8	30	20040801.1	4.6	13	12.48
8	19990930.4	4.5	22	312.86	31	20050218.1	4.1	14	7.34
9	19991001.1	4.2	32	302.63	32	20051121.1	4.4	31	303.69
10	19991001.2	4.6	6	128.96	33	20060819.1	5.5	12	251.41
11	19991001.3	4.5	11	135.37	34	20061020.1	4.7	33	197.9
12	19991002.1	4.3	14	292.92	35	20061108.1	5.1	70	81.04
13	19991214.1	4.2	10	16.36	36	20061110.1	4.8	62	210.98
14	20000102.1	4.3	22	306.81	37	20070315.1	5.1	16	331.2
15	20000301.1	4.9	12	138.81	38	20070627.1	4.4	72	59.35
16	20000510.1	4.7	9	329.15	39	20071121.1	4.6	20	359.16
17	20020511.1	4.5	42	304.5	40	20071211.1	4.6	36	127.86
18	20020607.1	5	33	84.05	41	20080212.1	6.6	284	84.77
19	20020607.2	5	33	84.05	42	20080504.1	4.5	75	140.88
20	20020827.1	5	44	282.86	43	20081209.1	4	8	20.74
21	20021202.1	4.8	50	108.32	44	20081231.1	4.1	10	51.2
22	20030419.1	4.4	27	340.31	45	20090407.1	4.8	59	103.38
23	20040113.1	5.1	6	18.1	46	20090523.1	3.6	7	332.28

Tabla IV.2 Sismos utilizados para la estación RIOG

RIOG										
No.	Sismo	M	De (Km)	Az (°)		No.	Sismo	M	De (Km)	Az (°)
1	19980203.1	6.4	119	106.86		21	20040113.2	5.7	31	94.75
2	19990113.1	4.5	29	71.63		22	20040113.3	4	25	83.79
3	19990615.1	7	239	358.12		23	20040114.1	4.6	26	86.32
4	19990828.1	4.5	17	169.34		24	20040210.1	4.4	26	79.11
5	19990930.1	7.6	44	98.89		25	20040303.1	4.8	59	168.25
6	19990930.3	4.2	7	34.85		26	20040614.1	6.4	80	285.95
7	19990930.4	4.5	13	52.49		27	20040614.2	4.3	70	279.25
8	19991001.1	4.2	10	359.4		28	20040801.1	4.6	30	78.65
9	19991001.2	4.6	34	109.18		29	20040807.1	5.9	243	62.72
10	19991001.3	4.5	38	113.64		30	20041210.1	5.4	93	169.87
11	19991002.1	4.3	13	96.19		31	20050218.1	4.1	29	76.21
12	20000102.1	4.3	11	57.82		32	20051121.1	4.4	10	5.36
13	20000510.1	4.7	22	88.36		33	20060819.1	5.5	18	126.8
14	20000606.1	4.5	28	348.73		34	20061020.1	4.7	42	155.81
15	20020511.1	4.5	18	335.53		35	20061108.1	5.1	96	87.71
16	20020607.1	5	59	93.48		36	20061110.1	4.8	61	184.23
17	20020607.2	5.6	51	102.5		37	20070315.1	5.1	20	69.82
18	20020827.1	5	16	279.77		38	20070627.1	4.4	93	71.6
19	20030419.1	4.4	25	45.51		39	20071211.1	4.6	63	117.88
20	20040113.1	5.1	28	92.98		40	20090407.1	4.8	87	103.84

Tabla IV.3 Sismos utilizados para la estación SCRU

SRCU										
No.	Sismo	M	De (Km)	Az (°)		No.	Sismo	M	De (Km)	Az (°)
1	20000312.1	5.9	298	125.51		20	20070915.1	5	150	21.42
2	20000929.1	4.7	75	262.87		21	20071001.1	4.7	147	38.9
3	20010109.1	5	227	113.11		22	20071020.1	4.5	43	254.62
4	20010119.1	6.3	262	116.53		23	20071024.1	4.8	120	123.18
5	20020116.1	6.7	196	114.54		24	20071126.1	5.6	222	116.14
6	20020130.1	5.6	226	338.31		25	20080211.1	4.8	105	88.12
7	20020413.1	4.7	4	345.68		26	20080212.1	6.6	71	89.79
8	20020805.1	5.3	111	235.05		27	20080730.1	5.1	98	256.89
9	20030802.1	4.3	72	237.93		28	20081204.1	4.2	22	32.34
10	20040420.1	5.2	135	22.33		29	20090117.1	5.2	266	100.35
11	20040807.1	5.9	98	345.64		30	20090218.1	4.8	79	43.15
12	20040818.1	5.7	8	48.54		31	20090302.1	4.2	43	202.31
13	20041215.1	4.5	30	235.66		32	20090310.1	4.9	169	80.09
14	20050521.1	3.9	15	270.94		33	20090407.1	4.8	159	255.69
15	20060707.1	4.7	121	248.83		34	20090408.1	4.5	139	112.53
16	20061001.1	4.8	70	96.66		35	20090526.1	4.6	59	233.39
17	20070115.1	4.5	43	228.43		36	20090607.1	5	202	91.14
18	20070706.1	6.2	142	57.26		37	20090620.1	4.4	104	80.39
19	20070911.1	4.8	97	152.54						

IV.3 PROCESO DE ENTRENAMIENTO Y PRUEBA

Se elaboraron redes para cada estación, y debido a que cada evento sísmico es registrado en tres direcciones ortogonales, se entrenó una red para cada dirección.

Ahora bien cada red está dividida en dos grupos: el de entrenamiento y el de prueba, en el primero se debe contar con suficientes registros para obtener un

entrenamiento adecuado. En la tabla IV.4 se presenta el desglose de los registros sísmicos utilizados.

Tabla IV.4 Relación de eventos sísmicos utilizados en el modelo

Estación	Número de sismos	Entrenamiento	Prueba
LANE	46	41	5
RIOG	40	34	6
SCRU	37	32	5

Los arreglos completos se presentan a continuación, cabe mencionar que se respetó el mismo número de evento asignado en las tablas IV.1 a IV.3.

Tabla IV.5 Grupo de entrenamiento y prueba estación LANE

LANE ENTRENAMIENTO					LANE ENTRENAMIENTO				
No.	Sismo	aMax			No.	Sismo	aMax		
		EO	NS	V			EO	NS	V
1	19980303.1	5.89	4.89	2.04	27	20040210.1	8.27	10.91	3.4
2	19981121.1	4.94	4.05	2.59	28	20040303.1	4.49	7.64	3.32
3	19990113.1	10.47	10.1	7.43	29	20040614.1	3.87	4.72	2.21
4	19990615.1	5.81	6.09	3.22	30	20040801.1	28.96	39.83	11.26
5	19990828.1	11.27	10.53	6.59	31	20050218.1	23.54	23.88	5.41
7	19990930.3	7.65	4.44	2.26	32	20051121.1	9.76	8.29	2.84
8	19990930.4	16.7	8.7	5.5	33	20060819.1	22.15	24.78	10.87
9	19991001.1	6.35	5.51	2.2	34	20061020.1	7.17	9.29	2.59
10	19991001.2	37.23	19.35	10	35	20061108.1	5.84	5.18	3.43
11	19991001.3	23.77	18.99	18.8	36	20061110.1	4.71	2.99	2.23
12	19991002.1	5.96	4.06	3.5	38	20070627.1	3.54	6.92	2.33
14	20000102.1	6.41	5.02	2.45	39	20071121.1	3.43	4	1.67
15	20000301.1	27.25	19.33	20.04	40	20071211.1	6.3	6.4	2.49
16	20000510.1	31.93	25.1	7.69	42	20080504.1	2.44	2.38	1
17	20020511.1	16.21	15.63	7.75	43	20081209.1	2.78	1.48	0.79
18	20020607.1	20	19.08	9.01	44	20081231.1	2.53	3.38	1
19	20020607.2	5.04	3.98	1.77	46	20090523.1	4.82	3.78	3.15
20	20020827.1	13.44	11.32	6.33	LANE PRUEBA				
21	20021202.1	6.37	6.75	3.22					
22	20030419.1	4.56	6.06	2.2	6	19990930.1	251.84	238.9	209.13
23	20040113.1	31.9	39.78	14.56	13	19991214.1	8.68	7.62	6.41
24	20040113.2	3.6	5.08	2.08	37	20070315.1	37.88	40	22.26
25	20040113.3	90.43	142.43	29.94	41	20080212.1	3.11	2.71	1.86
26	20040114.1	11.61	19.21	8.61	45	20090407.1	6.4	7.87	4.01

Tabla IV.6 Grupo de entrenamiento y prueba estación RIOG

RIOG ENTRENAMIENTO					RIOG ENTRENAMIENTO				
No.	Sismo	aMax			No.	Sismo	aMax		
		EO	NS	V			EO	NS	V
1	19980203.1	9.33	9.9	9.43	27	20040614.2	7.32	7.36	3.18
2	19990113.1	8.36	8.18	3.72	28	20040801.1	14.56	9.7	4.06
4	19990828.1	19.3	10.19	7.72	29	20040807.1	3.64	3.6	2.23
6	19990930.3	8.67	9.13	3.45	30	20041210.1	7.5	3.26	2.08
7	19990930.4	25.22	19.53	9.89	31	20050218.1	5.28	7.12	2.88
8	19991001.1	15.61	13.11	5.95	32	20051121.1	30.32	38.51	10.12
9	19991001.2	9.79	8.3	2.13	34	20061020.1	1.61	3.32	1.43
10	19991001.3	5.72	5.57	2.47	35	20061108.1	3.48	3.88	1.65
12	20000102.1	15.51	18.75	10.61	36	20061110.1	4.82	7.68	3.76
13	20000510.1	12.01	10.53	5.45	37	20070315.1	26.12	20.66	13.01
14	20000606.1	10.31	11.91	2.95	38	20070627.1	11.6	9.24	3.9
15	20020511.1	16.23	15.83	11.48	39	20071211.1	2.5	1.94	1.27
16	20020607.1	7	6.92	3.37	40	20090407.1	4.03	2.25	1.74
17	20020607.2	7.65	8.05	3.17	RIOG PRUEBA				
19	20030419.1	5.1	6.06	2.65					
20	20040113.1	19.62	23.04	12.2	3	19990615.1	5.08	6.41	3.17
22	20040113.3	6.4	5.27	1.59	5	19990930.1	290.59	307.47	230.99
23	20040114.1	8.67	6.52	3.46	11	19991002.1	55.46	46.27	12.61
24	20040210.1	8.08	7	3.9	18	20020827.1	42.11	31.62	23.46
25	20040303.1	3.24	5.07	1.87	21	20040113.2	62.28	50.16	29.55
26	20040614.1	9.71	8.1	5.2	33	20060819.1	59.3	47.74	26.93

Tabla IV.7 Grupo de entrenamiento y prueba estación SCRU

SCRU ENTRENAMIENTO					SCRU ENTRENAMIENTO				
No.	Sismo	aMax			No.	Sismo	aMax		
		EO	NS	V			EO	NS	V
1	20000312.1	6.29	6.47	4.1	24	20071126.1	4.03	4.23	2.81
2	20000929.1	6.19	5.35	3.83	25	20080211.1	5.21	5.71	5.42
3	20010109.1	6.29	4.8	3.11	27	20080730.1	9.29	6.41	5.04
4	20010119.1	5.83	3.12	3.25	28	20081204.1	1.34	1.39	0.95
5	20020116.1	20.51	15.02	12.6	29	20090117.1	4.42	2.66	3.12
7	20020413.1	16.83	20.18	10.62	30	20090218.1	2.62	2.61	4.99
8	20020805.1	7.53	7.75	5.21	31	0090302.1	8.73	6.68	8.03
10	20040420.1	8.58	8.28	4.05	32	20090310.1	1.99	1.36	3.14
13	20041215.1	13.49	11.59	9.83	33	20090407.1	1.63	0.84	0.57
14	20050521.1	10.78	14.2	6.26	34	20090408.1	2.34	2.74	1.06
15	20060707.1	4.61	6.09	3.54	35	20090526.1	7.57	7.16	4.82
16	20061001.1	9.35	3.92	8.57	36	20090607.1	1.78	1.72	1.07
17	20070115.1	8.97	8.99	6.63	37	20090620.1	4.87	4.1	2.12
18	20070706.1	8.81	7.21	11.12	SCRU PRUEBA				
19	20070911.1	3.55	2.8	3.17	6	20020130.1	10.75	9.57	6.01
20	20070915.1	3.33	3.07	2.39	9	20030802.1	7.98	5.19	4.13
21	20071001.1	3.2	3	2.28	11	20040807.1	23.64	20.59	11.59
22	20071020.1	8.19	7.57	4.88	12	20040818.1	49.39	44.14	22.81
23	20071024.1	2.37	2.22	1.61	26	20080212.1	80.3	53.06	55.38

Durante el proceso de entrenamiento se observó que las RNA's presentaban limitaciones para representar valores máximos, específicamente los valores de aceleración asociados a los sismos 199909.301 con magnitud de 7.6 en las estaciones LANE y RIOG y el 200802.121 en la estación SCRU. Como solución a esta dificultad se decidió integrar un sismo mas a los conjuntos de entrenamiento de las tres estaciones, el cual se obtuvo utilizando las leyes de atenuación de Esteva y Villaverde (ref 47) y Esteva (ref 48) para obtener una aceleración en función de una magnitud de 8 para

LANE y RIOG y con magnitud 7 para SCRUI, la distancia epicentral y el azimut permanecieron constantes a los valores originales de los sismos base que causaron este impedimento en la red. Enseguida se presentan las leyes de atenuación utilizadas así como los parámetros de los sismos obtenidos mediante ellas.

$$a = 1230e^{0.8M}(R + 25)^{-2} \quad \dots 4.1$$

Donde M es la magnitud y R es la distancia hipocentral

$$a = 2000 e^{0.8M} R^{-2} \quad \dots 4.2$$

Donde M es la magnitud y R es la distancia focal efectiva

Tabla IV.8 Sismos obtenidos mediante leyes de atenuación

Sismo	M	De (km)	Az (°)	Amax por componente (cm/s ²)		
				EO	NS	V
LANE9909.301	7.6	16	89.27	251.84	238.90	209.13
Ec. 4.1	8	16	89.27	326.34		
RIOG9909.301	7.6	44	98.89	290.59	307.50	230.99
Ec. 4.2	8	44	98.89	389.29		
SCRUI0802.121	6.6	71	89.79	80.3	53.06	55.38
Ec. 4.1	7	71	89.79	63.33		

Al integrar estos sismos a los conjuntos de entrenamiento se observó que la red pudo aprender a relacionar los valores de manera aceptable.

En este trabajo se optó por utilizar una función sigmoïdal, como función de transferencia para todas las capas ocultas y como función de transferencia en la capa de salida una función lineal.

Las arquitecturas empleadas en el entrenamiento del modelo se realizaron mediante el software de redes neuronales para Windows, *Thinks Pro* (ref 49), el cual se basa en procesos iterativos. Dicho programa grafica la superficie de error en tiempo real, y por experiencia se fija un mínimo, el cual se decide que es el mínimo global, en general

este proceso depende del conocimiento del fenómeno a modelar y de la habilidad de quien diseñe la RNA.

La regla que dio mejores resultados en el entrenamiento de las redes fue el algoritmo de *Levenberg Marquardt* que minimiza el cuadrado de las diferencias entre la respuesta o salida deseada y la salida de la red.

La tabla IV.9 muestran las arquitecturas empleadas en las redes de la siguiente forma: nodos entradas X nodos primera capa oculta X nodos segunda capa oculta X nodos salida.

Tabla IV.9 Arreglos empleadas en el modelo

RED	ARQUITECTURA	No. ITERACIÓN
EW LANE	3X20X10X5X1	57
NS LANE	3X100X1	30
VERT LANE	3X100X1	67
EW RIOG	3X20X10X1	57
NS RIOG	3X40X10X1	54
VERT RIOG	3X20X10X1	37
EW SCRUI	3X100X1	49
NS SCRUI	3X100X1	48
VERT SCRUI	3X9X6X3X1	49

IV.4 RESULTADOS

La selección de los parámetros de entrenamiento así como el diseño de las RNA, se realizaron con la idea fundamental de que la red tuviera capacidad predictiva, con eventos no utilizados en el entrenamiento, así como ante otros que todavía no ocurren pero que, debida a la zona de la República Mexicana, para la cual se realizó el modelo, tienen gran probabilidad de presentarse en un futuro. En el proceso de

prueba se utilizaron datos reales (sin utilizar leyes de atenuación) que no se incluyeron durante la etapa de entrenamiento.

La figura IV.4 muestra los resultados del proceso de prueba de las tres estaciones, en donde para interpretarlos se parte de que, si una red tiene una perfecta etapa de prueba los resultados obtenidos de esta deberán ajustarse a una recta de 45°, ya que en el eje de las abscisas se encuentran las aceleraciones reales, y en el eje de las ordenadas los valores estimados por la RNA.

La primer gráfica es la correspondiente a la estación LANE, debajo se encuentran los resultados de la estación RIOG, en ambas gráficas se aprecia una mayor dispersión cuando la aceleración es superior a 200 cm/s². En la estación LANE el punto que se encuentra más separado de la recta es el del sismo 19990930.1 en la componente este-oeste, donde la red sobre estimó en un 27% el valor real de la aceleración. Para la estación RIOG el punto que mayor dispersión presenta, corresponde al mismo sismo sólo que un su componente vertical, donde se presenta una sobre estimación de 30%. Al final de esta figura se presentan los resultados obtenidos para la estación SCRJ, los cinco sismos que integraron esta etapa son sismos que no rebasan los 85 cm/s², es por ello que esta gráfica tiene una escala diferente a las anteriores. El error más grande que se obtuvo fue para el sismo 20080212.1 en la componente este-oeste, la red sub estimó el valor de la aceleración en un 45%.

En la figura IV.5 se presenta de manera global, los resultados del proceso de prueba del modelo, las tres estaciones con sus tres componentes.

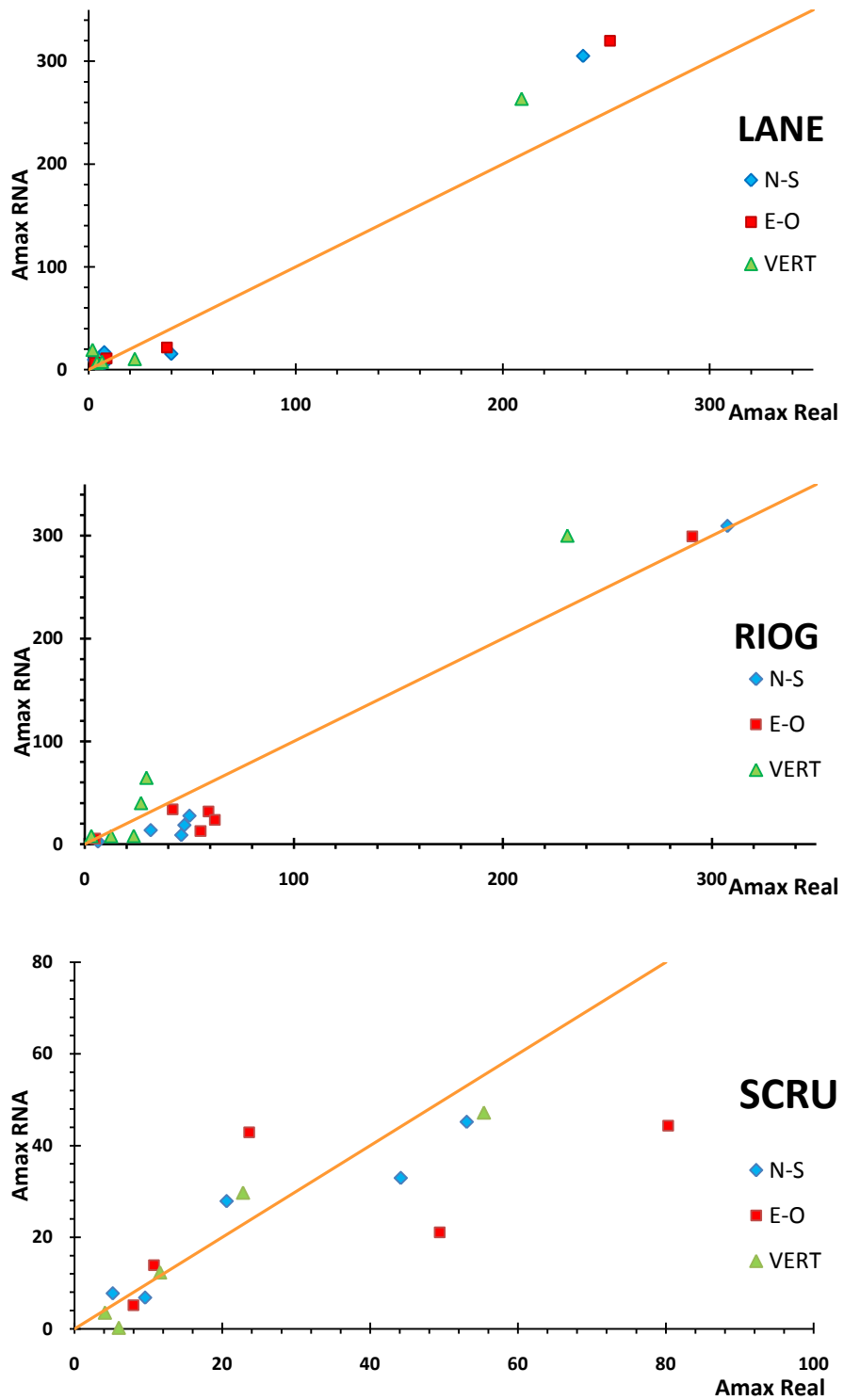


Figura IV.4 Resultados de las tres estaciones

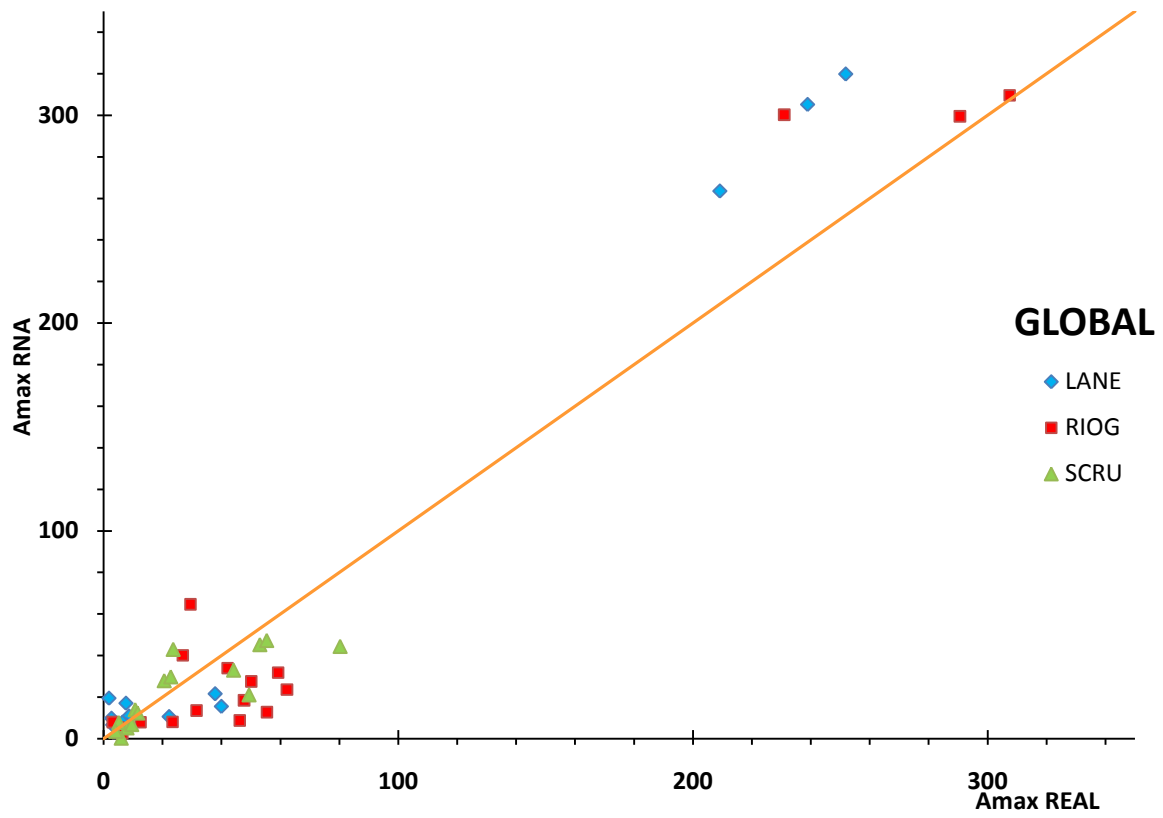


Figura IV.5 Resultados de las tres estaciones con sus tres componentes