

Revista

CIENCIA

EDITOR

Roberto Aguiar Falconí

Centro de Investigaciones Científicas
Escuela Politécnica del Ejército
Valle de los Chillos, Ecuador
e-mail: raguiar@espe.edu.ec

COMITÉ EDITORIAL

A.H. Barbat

E.T.S. Ingenieros de Caminos y Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Cantuña
Campus Norte UPC, 08034.

J. L. Almazán

Escuela de Ingeniería
Pontificia Universidad Católica de Santiago
Santiago de Chile

L. Córdova

Facultad de Ciencias y Humanidades
Universidad del Valle de Guatemala
Guatemala.

P. Dechent

Escuela de Ingeniería
Universidad de Concepción
Concepción, Chile

S. Fernández

Academia de Estructuras
Instituto Politécnico Nacional
México D.F.

P. Caiza

Centro de Investigaciones Científicas
Escuela Politécnica del Ejército
Valle de los Chillos, Ecuador

C. Genatios

Instituto de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad Central de Venezuela
Caracas, Venezuela.

L. Cumbal

Centro de Investigaciones Científicas
Escuela Politécnica del Ejército
Valle de los Chillos, Ecuador.

A. Tierra

Centro de Investigaciones Científicas
Escuela Politécnica del Ejército
Valle de los Chillos, Ecuador.

M- Lafuente

Instituto de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad Central de Venezuela
Caracas, Venezuela.

W. Pozo

Centro de Investigaciones del IASA
Escuela Politécnica del Ejército
Valle de los Chillos, Ecuador.

M. Romo

Centro de Investigaciones Científicas
Escuela Politécnica del Ejército
Valle de los Chillos, Ecuador.

J. M Ruiz

Facultad de Construcciones
Departamento de Ingeniería Civil
Universidad de Oriente
Santiago de Cuba, Cuba.

S. Ruiz

Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
México D.F.

F. Williams L.

Instituto de Ingeniería
Universidad Veracruzana
Veracruz, México.

A. Oleas

Centro de Investigaciones del IASA
Escuela Politécnica del Ejército
Valle de los Chillos, Ecuador.

FORMATO DE TEXTO

Javier Villamarín

Centro de Investigaciones Científicas
Escuela Politécnica del Ejército
Valle de los Chillos, Ecuador

ISSN 1390-1117

©2010 ESPE, Quito, Ecuador

Revista

CIENCIA

Sumario

Volumen 13, número 1, 2010

- Leyes de Atenuación para Sismos Corticales y de Subducción para el Ecuador** 001
Roberto Aguiar Falconí, Edwin García y Javier Villamarín
- Análisis Sísmico en sentido longitudinal del Puente Sur que tiene aisladores FPS con CEINCI-LAB. Comparación entre dos modelos** 019
Roberto Aguiar Falconí y Darwin Carrera
- Pesticidas Naturales y Sintéticos** 043
Vladimir Aguirre Yela y Vicente Delgado
- Evaluación de dos métodos para la reducción de nitrógeno, fósforo y DQO de aguas residuales, mediante un cultivo axénico de cianobacterias y un consorcio microbiano, inmovilizados y en suspensión** 055
Mauricio Moreno, Blanca Naranjo y Alma Koch
- Análisis sísmico en sentido longitudinal del Puente Carrizal con dos modelos. Empleando CEINCI-LAB** 063
Roberto Aguiar Falconi y Edwin García
- Utilización de hongos micorrízico-arbusculares en plántulas de tomate de árbol (*solanum betaceum*) cultivadas *in vitro*. Efectos durante la fase de aclimatación** 087
Espín E., Medina M.E., Jadán M, & Proaño K.
- Evaluación de la actividad del formononetín, ácido 3-indol burítico y tiamina para promover la germinación *in vitro* de esporas de hongos micorrízico-arbusculares (HMA)** 095
Baroja I., Medina M.E. & Proaño K.

Revista Semestral de la Escuela Politécnica del Ejército Quito, Ecuador.

ISSN 1390-1117

© 2010 ESPE, Quito – Ecuador

ESPE, Quito – Ecuador

LEYES DE ATENUACIÓN PARA SISMOS CORTICALES Y DE SUBDUCCIÓN PARA EL ECUADOR

Roberto Aguiar Falconí, Edwin García y Javier Villamarín

Centro de Investigaciones Científicas
Escuela Politécnica del Ejército
raquiar@espe.edu.ec

RESUMEN

En base a la información macrosísmica de 14 sismos asociados a fallas corticales y a 7 sismos de subducción, la mayor parte de ellos registrados en el Ecuador y unos pocos en el Sur de Colombia pero que afectaron al Ecuador, se determinó una Ley de Atenuación de Intensidades en la escala de Mercalli Modificada. Se tienen 69 datos para los sismos corticales y 38 datos para los sismos de subducción.

Por otro lado, en base a información macrosísmica y de registros sísmicos, se obtuvo una relación entre la Intensidad máxima en la Escala de Mercalli y la aceleración máxima del suelo, con los datos de 7 sismos registrados en América del Sur. En total se trabajó con 99 puntos.

Posteriormente, se presentan dos propuestas de Leyes de Atenuación de las aceleraciones del suelo, para ser utilizados en estudios de Peligrosidad Sísmica en el Ecuador. La primera encontrada a partir de la relación entre la aceleración máxima del suelo y de la intensidad máxima, obtenida en este estudio y la segunda empleando la relación de Saragoni *et al.* (1982). De tal manera que se obtuvieron cuatro Leyes de Atenuación, dos para la primera propuesta y dos para la segunda propuesta.

Para cada propuesta se tienen dos leyes, una para sismos corticales y la otra para sismos de subducción. Estas propuestas fueron comparadas con otros estudios realizados por Aguiar y Castro en 2009; y con leyes obtenidas a partir de registros sísmicos en Chile, por Ruiz y Saragoni en 2005.

ABSTRACT

Based on macro seismic information for 14 earthquakes associated with crustal faults and 7 subduction earthquakes, most of them registered in Ecuador and a few in southern Colombia but that affected Ecuador, a Law of Attenuation using the Modified Mercalli Intensity Scale was determined. There are 69 data bases for cortical earthquakes and 38 for subduction earthquakes.

On the other hand, based on macroseismic information and seismic records -7 earthquakes recorded in South America-, we obtained a relationship between the maximum Intensity on Mercalli scale and the maximum ground acceleration. In total we worked with 99 points.

Subsequently, two proposals of Laws of Attenuation for ground accelerations are presented for use in studies of Seismic Hazard in Ecuador. The first one was found from the relationship between maximum ground acceleration and the maximum intensity obtained in this study and the second using Saragoni *et al.* (1982) relationship. In such a way four Laws of Attenuation were obtained, two for the first proposal and two for the second proposal.

For each proposal there are two laws, one for crustal earthquakes and the other for subduction earthquakes. These proposals were compared with other studies conducted by Aguiar and Castro in 2009 and with laws obtained from seismic records in Chile by Ruiz and Saragoni in 2005.

1. INTRODUCCIÓN

Venezuela, Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Chile y Argentina se han visto afectados, muy frecuentemente, por grandes sismos que han dejado grandes pérdidas humanas y económicas. En la tabla 1 se indican los sismos más destructivos que se han registrado en América del Sur en los últimos 15 años; se tiene un total de 14 sismos lo que en promedio significa un sismo catastrófico por año.

Tabla 1 Sismos destructivos registrados en los últimos 15 años en América del Sur.

Sismo	Fecha	Hora	Latitud	Longitud	Magnitud	Profundidad	Intensidad
Ecuador	28/03/1996	18:03	1.04 S	78.72 W	Mw= 5,9	15,2 km	VII
Perú	12/11/1996	17:00	15.30 S	76.44 W	Md= 6,4	14,0 km	VII
Venezuela	09/07/1997	15:24	10.43 S	63.49 W	Ms= 6,8	10,0 km	VIII
Bolivia	22/05/1998	1:48	17.73 S	65.43 W	Mw= 6,8	24,0 km	VIII
Ecuador	04/08/1998	13:59	0.55 S	80.53 W	Ms= 7,1	39,0 km	VIII
Colombia	25/01/1999	13:19	4.41 N	75.72 W	M _L = 6,2	< 15 km	VIII
Perú	23/06/2001	15:33	16.15 S	73.40 W	Mw= 7,4	33,0 km	VII-VIII
Colombia	15/11/2004	9:06	4.81 N	77.79 W	Mw= 7,2	< 33 km	VII *
Chile	13/06/2005	22:44	19.89 N	69.12 W	Mw= 7,9	117 km	VII
Perú	25/09/2005	20:56	5.68 N	76.4 W	Mw= 7,5	115,0 km	VI
Perú	15/08/2007	18:40	13.49 S	76.85 W	Mw= 7,9	26,0 km	VII-VIII
Chile	14/11/2007	12:40	22.18 S	69.84 W	Mw= 7,7	60,0 km	VIII
Colombia	24/05/2008	19:20	4.44 N	73.67 W	Mw= 5,9	4,0 km	IV *
Chile	27/02/2010	3:34	35.85 N	72.72 W	Mw= 8,8	47,4 km	IX

* Escala EMS-98

De los 14 sismos indicados en la tabla 1, 4 son registrados en Perú, 3 en Chile, 3 en Colombia, 2 en Ecuador, 1 en Venezuela y 1 en Bolivia. Considerando la longitud de la costa del Ecuador con relación a la longitud de las costas de Colombia, Perú y Chile, el número de sismos registrados es muy alto. Todo esto refleja la gran peligrosidad sísmica de todos los países mencionados.

En la tabla 2 se presenta el número de víctimas de los sismos anotados en la tabla 1. Es impresionante la cantidad de muertos que dejaron tres sismos: el que afectó al eje cafetero de Colombia el 25 de enero de 1999; el sismo de Pisco de 2007 en Perú y el sismo de 2010 que causó tanto daño en la región central de Chile. El número de muertos de estos tres terremotos es de 2624 personas. Cantidad sumamente alta por que los sismos no matan gente, son las estructuras mal diseñadas las que matan a las personas, son la mala ubicación en que se encuentran esas viviendas que han sido construidas a lo mejor sin la aprobación de las autoridades municipales, no de otra manera se explica como se permite construir en la misma playa a sabiendas de que son lugares muy vulnerables ante un tsunami.

En el sismo de Colombia de 1999, los Departamentos de Quindío y Manizales sufrieron mucho daño, una muy buena parte de las construcciones que se vinieron a bajo fueron de

adobe y otras no tuvieron diseño sismo resistente las cuales fueron construidos antes de 1984, año en el que se promulgó la primera normativa de diseño sismo resistente en Colombia. Aguiar (1999).

La ciudad de Pisco, luego del sismo de 2007, parecía una ciudad que había sufrido gran bombardeo en una guerra; la mayor parte de sus construcciones eran de adobe y no habían sido reforzadas. Ciudades como Guadalupe, con un 90% de construcciones de adobe fueron dañadas totalmente, por eso el gran número de muertos y heridos. Pero también edificios de hormigón armado

Tabla 2 Pérdidas humanas y económicas en los últimos 15 años.

Sismo	Muertos	Heridos	Pérdida Económica
Ecuador 1996	27	156	5 millones de US
Perú 1996	17	1591	43 millones de US
Venezuela 1997	74	522	100 millones de US
Bolivia 1998	105	315	15 millones de US
Ecuador 1998	3	52	30 millones de US
Colombia 1999	1230	5300	1800 millones de US
Perú 2001	102	1368	
Colombia 2004			
Chile 2005	11	182	40 millones de US
Perú 2005	10	164	
Perú 2007	595	1368	230 millones de US
Chile 2007	2	140	
Colombia 2008	11	50	
Chile 2010	799		15000 millones de US



Figura 1 Estructuras dañadas en el sismo del Perú de 2007.

En la parte superior izquierda de la figura 1, se aprecia un edificio con **piso blando** que colapsó en la ciudad de Pisco, a la derecha dentro de un círculo se ve el gran daño en la columna de un centro de salud, esta falla se denomina **columna corta**. En la parte inferior izquierda se ve el colapso de una casa de adobe de la ciudad de Guadalupe. Finalmente en la figura inferior derecha se aprecia el daño debido al **choque de edificios**. Todo esto sucedió en el sismo de Perú de 2007.

El último sismo fuerte fue el registrado el 27 de febrero de 2010 en Chile, nuevamente las construcciones de adobe fueron destruidas durante el sismo, lo propio sucedió con edificaciones sin mantenimiento pero también edificios de hormigón armado colapsaron en la ciudad de Concepción. Un buen número de personas murió con el Tsunami que se dio después del sismo.

Todo esto nos hace ver la necesidad de investigar en varios campos: el sismológico, para poder realizar estudios de peligrosidad sísmica con la mejor información sísmica disponible; en dispositivos de control pasivo como aisladores de base para minimizar la energía sísmica que ingresa a una estructura y causa daño; en disipadores de energía pensando en reforzar estructuras, entre otros temas.

En el Ecuador no se dispone de registros con aceleraciones mayores a 0.2 g., siendo "g" la aceleración de la gravedad. Del último sismo fuerte de Bahía de Caráquez de 1998, no se tiene un acelerograma con valor mayor al ya anotado. En los estudios de peligrosidad sísmica se necesita una ley de atenuación pero al no tener acelerogramas de sismos fuertes, no queda otra opción que el obtener una ley de atenuación a partir de información macrosísmica y es lo que se realiza en el presente trabajo.

Tabla 3 Valores de D para cada Intensidad de isosistas. Aguiar y Castro (2009).

#	SISMOS	FECHA	Mw.	D (Km).								
				X	IX	VIII	VII	VI	V	IV	III	II
1	RIOBAMBA	04-02-1797	7.70	25.25	49.14	88.69	136.20	182.40	230.90	276.76	392.23	
2	OTAVALO	16-08-1868	7.17	44.79	81.23	105.31	233.45	271.51				
3	ESMERALDAS	31/01/1906	8.60		29.48	84.76	153.57	215.94	291.26			
4	PASTO CALLE	15/09/1944	5.92				34.03	38.47	45.15			
5	PELILEO	05/08/1948	6.93	11.46	14.80	20.95	28.94	37.50	53.90	77.24		
6	AMBATO	05/08/1949	6.37		77.79	93.89	143.76		334.23			
7	NAPO	11/05/1955	6.98			40.06	66.71	180.72				
8	BAHÍA	16/01/1956	7.30			32.60	53.00	107.26	214.95	326.78		
9	ESMERALDAS	10/01/1958	7.80				101.97	146.89	219.59	284.28		
10	PASA	30/07/1960	5.97				22.14	24.28	30.99	55.86	88.02	
11	ALAUÍ	08/04/1961	6.35				26.63	43.15	57.47	83.58		
12	BAHÍA	19/05/1964	6.40			44.39	58.70	85.40	109.02	176.52		
13	NABÓN	22/03/1966	6.21			44.03	49.39	76.51	92.27	174.11		
14	PASTO CALLE	06/10/1976	5.92			12.64	17.82	24.02	43.76	74.62	103.96	
15	ESMERALDAS	09/04/1976	6.31				15.96	105.61	173.95	229.08	278.52	
16	TUMACO	12/12/1979	7.70		27.49	68.94	163.99	250.60				
17	BAEZA	03/05/1987	7.00		16.61	28.70	56.78	80.47	106.85	132.32	200.64	
18	BAHÍA DE CARÁQUEZ	08/04/1998	7.10			350.53	354.02	369.14	381.07	422.51	430.89	
19	MACAS	03/10/1995	6.90			160.93	202.61	222.90	247.40	257.29		
20	PUJILÍ	28/03/1996	5.72				33.57	42.07	60.69	83.82	118.03	174.42

2. LEY DE ATENUACIÓN DE INTENSIDADES

Aguiar y Castro (2009) encontraron una ley de atenuación de Intensidades al trabajar con la información macrosísmica indicada en la tabla 3. Se trabajó con todos los sismos indicados en la tabla 3 sin clasificarlos en el sentido si están asociados a fallamiento cortical o están asociados al proceso de subducción; clasificación que se considera en el presente trabajo. En la tabla 3 la variable D es la distancia al foco.

La ley de atenuación de intensidades encontrada por Aguiar y Castro (2009) es la siguiente.

$$I = 3.3577 + 1.0013 M_w - 0.8856 \ln(D + 10) \quad (1)$$

Donde I es la intensidad en la escala de Mercalli Modificada; M_w es la magnitud de Kanamori o momento sísmico y D la distancia hipocentral.

2.1 Reemplazo de curvas isosistas

Ahora bien se volvió a estudiar el sismo de Ibarra del 16 de agosto de 1868, empezando por indicar que la magnitud es $M_w = 7.7$ y no 7.17 como consta en la tabla 3. Aguiar (2010). Este terremoto se denomina sismo de Ibarra, aunque en ciudades como Otavalo, Atuntaqui hubo más daño que en Ibarra. Se trabajó ahora con la curva de isosistas del Observatorio Astronómico, indicada en la figura 2.

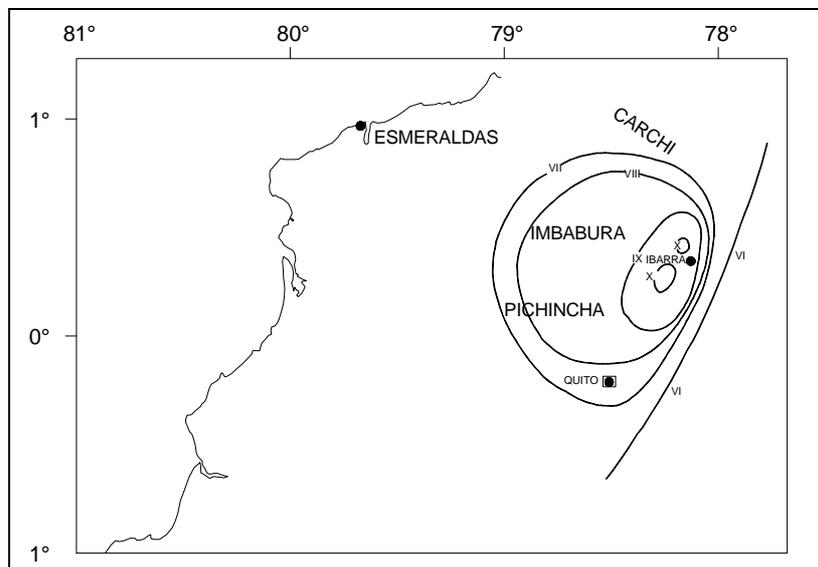


Figura 2 Isosista del sismo de Ibarra de 1868. Fuente: Observatorio Astronómico.

También se cambió las curvas isosistas del sismo de 1906, por las proporcionadas por Gallego y Sarria (2006). La isosista de este sismo, con la que se trabajó en este artículo es la presentada en la figura 3. Este sismo es uno de los que más energía a liberado a nivel mundial, en el Ecuador es el de mayor magnitud.

Las curvas de isosistas del último sismo que se cambió es la del sismo de Tumaco del 12 de diciembre de 1979. La curva de isosista de este sismo es la indicada en la figura 4.

2.2 Nuevas curvas de isosistas

Por otra parte se incorporó nuevas curvas de isosistas, que no fueron consideradas en el estudio de Aguiar y Castro (2009). Las nuevas curvas corresponden a los sismos de Manabí del 13 de mayo de 1942 que causó mucho daño en edificios de hormigón armado ubicados en la ciudad de Guayaquil y se llegó a pensar de que el hormigón armado no es un material adecuado para zonas sísmicas pero con el tiempo se vio todas las deficiencias constructivas que se habían cometido, se encontró que en lugar de estribos los hierros longitudinales de las columnas habían sido amarrados con sogas y cosas similares, de ahí que tuvieron un mal comportamiento.

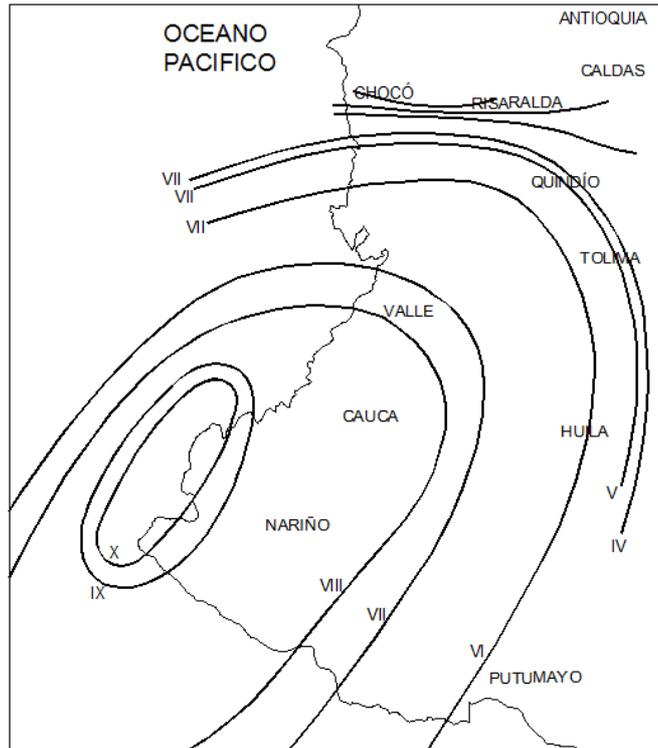


Figura 3 Isosista del sismo de 1906. Fuente: Gallego y Sarria (2006).

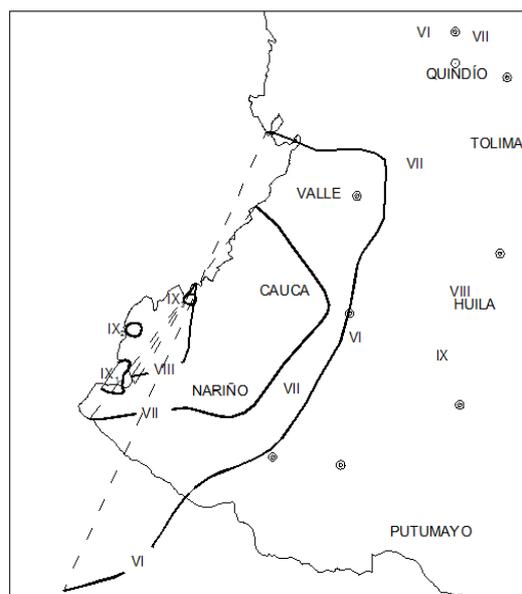


Figura 4 Isosista del sismo de Tumaco de 1979. Fuente: Gallego (2010)

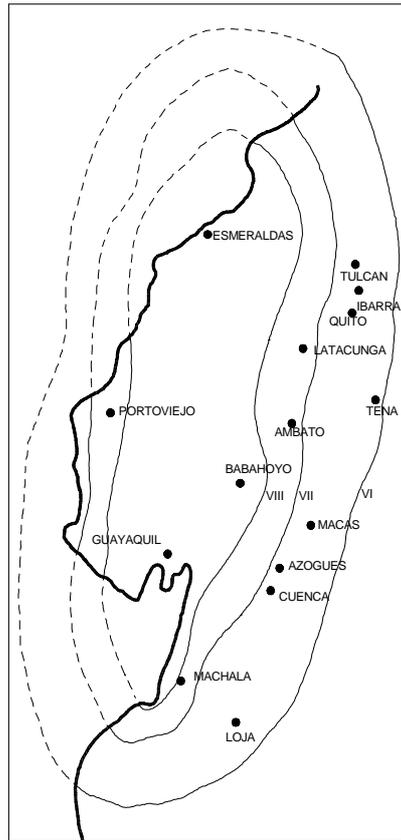


Figura 5 Isosista del sismo de 1942. Fuente: Observatorio Astronómico.

En base a la curva de isosistas se estimó que la profundidad focal del sismo de 1942 fue de 50 km., la magnitud de este terremoto fue de 7.9. En la figura 5 se indica las isosistas del sismo de 1942.

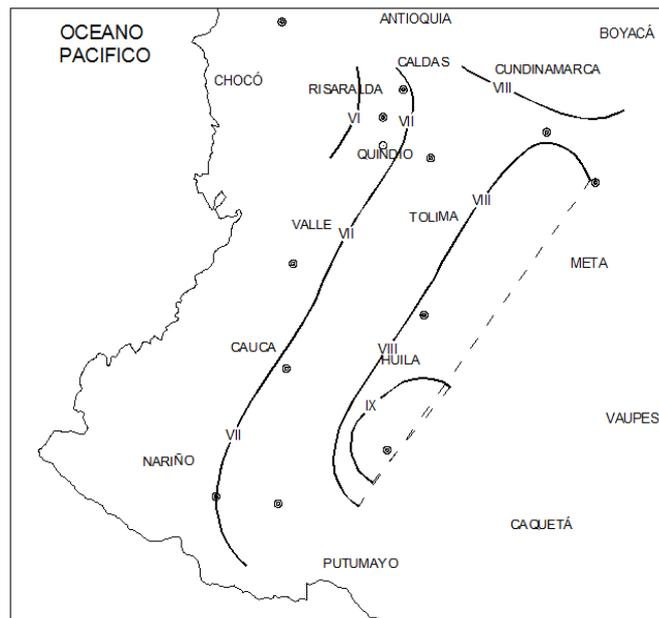


Figura 6 Sismo de Huila del 16 de noviembre de 1827. Fuente: Gallego (2010).

Se incorporó también al estudio el sismo de Huila del 16 de noviembre de 1827 que se registró en el Sur de Colombia y se lo sintió en el Ecuador. La isosista de este evento se lo indica en la figura 6.

2.3 Sismos asociados a fallamiento cortical

No solo que se cambiaron las curvas de isosistas y que se incorporó nuevas curvas de otros terremotos, con relación al trabajo realizado por Aguiar y Castro (2009). Si no que, lo más importante es que se separaron los sismos de acuerdo a su origen. Se separó en sismos asociados a fallamiento cortical y sismos de subducción.

En la tabla 4 se presentan los 14 sismos asociados a fallamiento cortical con los cuales se obtuvo la siguiente ley de atenuación pero antes se destaca que son 69 puntos los que intervinieron en el cálculo de la ecuación.

$$I = 3.756 + 1.586 * M_w - 1.861 * \ln(D + 10) \quad (2)$$

El significado de las variables ha sido ya indicado. La desviación estándar de esta ecuación es 1.21. García (2010).

Tabla 4 Sismos asociados a fallamiento cortical.

#	SISMOS	FECHA	Mw	h	SISMOS CORTICALES									
					D = (R ² + h ²) ^{0,5}									
					X	IX	VIII	VII	VI	V	IV	III	II	
1	RIOBAMBA	04/02/1797	7,70	15,00	25,26	49,15	88,69	136,20	182,40	230,90	276,77	392,24		
2	OTAVALO	16/08/1868	7,70	33,00	33,72	40,53	59,43	68,54						
3	PASTO CALLE	15/09/1944	5,92	33,00				34,03	38,47	45,15				
4	PELILEO	05/08/1948	6,93	10,00	11,47	14,80	20,95	28,94	37,50	53,90	77,24			
5	AMBATO	05/08/1949	6,37	60,00			77,79	93,89	143,76		334,23			
6	HUILA	05/08/1949	8,00	33,00		54,00	105,54							
7	NAPO	11/05/1955	6,98	33,00			40,06	66,70	180,72					
8	PASA	30/07/1960	5,97	21,00				22,15	24,29	30,99	55,86	88,01		
9	ALAUÍ	08/04/1961	6,35	24,00				26,63	43,15	57,47	83,58			
10	NABON	22/03/1966	6,21	42,00			44,03	49,39	76,51	92,27	174,11			
11	PASTO CALLE	06/10/1976	5,92	7,40			12,63	17,82	24,02	43,76	74,62	103,96		
12	BAEZA	03/05/1987	7,00	10,00		16,61	28,70	56,78	80,47	106,85	132,32	200,64		
13	MACAS	03/10/1995	6,90	160,20			160,93	202,61	222,90	247,40	257,29			
14	PUJILÍ	28/03/1996	5,72	33,00				33,56	42,07	60,69	83,82	118,04	174,42	

2.3 Sismos asociados a la subducción

En la tabla 5 se presentan los 8 sismos que fueron considerados para encontrar la ley de atenuación, asociados con la subducción. Nótese que se tienen 38 puntos. Al igual que en la tabla 4, en las últimas columnas de la tabla 5 se indica la distancia al hipocentro de un círculo equivalente a la isosista obtenida. La Ley de Atenuación encontrada es la siguiente:

$$I = -1.484 + 1.402 * M_w - 0.545 * \ln(D + 10) \quad (3)$$

Tabla 5 Sismos asociados a la subducción.

#	SISMOS	FECHA	Mw	h	SISMOS SUBDUCCIÓN									
					D = (R ² + h ²) ^{0,5}									
					X	IX	VIII	VII	VI	V	IV	III	II	
*1'	ESMERALDAS	31/01/1906	8,8	25	61,46	81,06	180,36	212,94	303,17					
*2	MANABI	13/05/1942	7,8	50			128,97	164,29	217,67					
3	BAHIA	16/01/1956	7,3	25			32,598	53,006	107,26	214,95	326,78			
4	ESMERALDAS	10/01/1958	7,8	60				101,97	146,88	219,59	284,28			
5	BAHIA	19/05/1964	5,64	34			44,384	58,699	85,4	109,02	176,53			
6	ESMERALDAS	09/04/1976	6,31	10				15,961	105,61	173,95	229,08	278,52		
*7'	TUMACO	12/12/1979	7,7	24		28,37	34,86	89,05	133,50					
7	BAHIA DE CARÁQU	08/04/1998	7,1	350,5			350,53	354,02	369,14	381,07	422,51	430,9		

Las variables de la ecuación (3) ya fueron indicadas; resta indicar que la desviación estándar es 1.16

3. RELACIÓN ENTRE ACELERACIÓN MÁXIMA E INTENSIDAD

En las ecuaciones (2) y (3) se ha definido Leyes de Atenuación de la Intensidad en función de la Magnitud y de la Distancia al hipocentro. Ahora, para fines de diseño sismo resistente se necesita definir una relación con la cual se pase de Intensidad a Aceleraciones máximas del suelo. Esta relación es de la siguiente forma:

$$\log A_{\max} = a I_{MM} + b \tag{4}$$

Donde A_{\max} es la aceleración máxima esperada; I_{MM} es la intensidad en la escala de Mercalli Modificada; a y b son parámetros que se obtienen en función de los datos con los cuales se trabajan. En la tabla 6 se indican los parámetros a, b de algunos trabajos realizados.

Tabla 6 Algunos trabajos sobre relación entre Intensidades y Aceleraciones.

Autor	a	b
Trifunac y Brady (1975)	0.300	-0.014
Bolt	0.313	0.340
Murphy, O' Brien (1977)	0.250	0.250
Lomnitz (1974)	0.333	-0.500
Saragoni <i>et al.</i> 1982	0.345	-0.222
Saegesser y Baumbartner (1978)	0.26	0.19
Medvedev-Sponheuer (1969)	0.30	-0.40
	0.30	-0.1

En las cinco primeras ecuaciones de la tabla 6, la Intensidad corresponde a I_{MM} (Mercalli Modificada), en las dos últimas es I_{MSK} (Medvedev, Sponheuer y Karnik). Estrictamente la ecuación de Medvedev-Sponheuer (1969) es la siguiente:

$$0.3 I_{MSK} - 0.4 \leq \log A_{\max} \leq 0.30 I_{MSK} - 0.1 \tag{5}$$

Siete son los sismos con los cuales se halló una relación entre la aceleración máxima y la Intensidad en la escala de Mercalli y son los registrados en Colombia en 1999, 2004 y 2008; en Chile en 2005, 2007 y 2010; en Perú en 2007. Las aceleraciones máximas del sismo de Chile de 2010 fueron proporcionadas por Boroschek *et al.* (2010) y son acelerogramas no corregidos.

En el anexo 1, se muestran los 99 datos de estos sismos con los cuales se halló la siguiente relación

$$\log(A_{MAX}) = 0.3629 + 0.2355 * I_{MM} \tag{6}$$

Siendo A_{MAX} la aceleración máxima del registro; I_{MM} la intensidad en la escala de Mercalli Modificada. En la figura 7 se muestran los pares de valores de intensidad y aceleración máxima, también se encuentra graficada la ecuación (6) hallada en el estudio. La desviación estándar de esta ecuación es 0.533

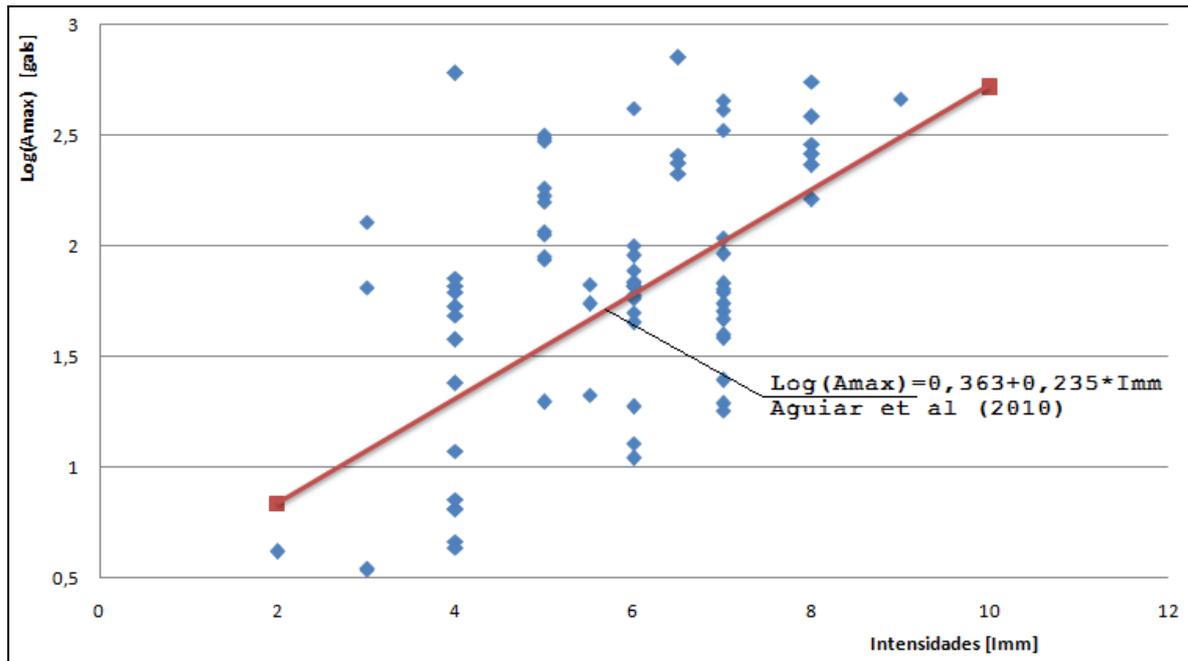


Figura 7 Relación entre Aceleración Máxima e Intensidad, hallada en el estudio.

4. LEYES DE ATENUACIÓN. PRIMERA PROPUESTA.

Al reemplazar la ecuación (6) en las ecuaciones (2) y (3) se tienen las nuevas Leyes de Atenuación para el Ecuador, para sismos asociados a fallamiento cortical y para sismos de subducción. Estas Leyes son las siguientes:

- **Fallamiento Cortical**

$$\log(A_H) = 1.2474 + 0.3735 * M_w - 0.4383 * \text{Ln}(D + 10) \quad (7)$$

- **Subducción**

$$\log(A_H) = 0.0134 + 0.3302 * M_w - 0.1284 * \text{Ln}(D + 10) \quad (8)$$

Donde A_H es la aceleración horizontal en gals; M_w la magnitud y D la distancia al foco en km. La desviación estándar de las Leyes de Atenuación encontradas, son: 0.65 para los sismos asociados a fallamiento cortical y 0.62 para los sismos de subducción.

En las figuras 8 y 9 se presentan estas leyes para sismos de magnitud $M_w = 6$ y $M_w = 7$, respectivamente. También se presenta la ley de atenuación hallada por Aguiar y Castro (2009). Del análisis de estas figuras se desprende lo siguiente: 1) La Ley de Atenuación de Aguiar y Castro (2009) se aproxima bastante bien a la Ley de Atenuación encontrada en este estudio para sismos corticales; 2) Es muy marcada la diferencia entre la Ley de Atenuación para sismos corticales y la Ley de Atenuación para sismos de subducción. Esta última presenta valores muy bajos.

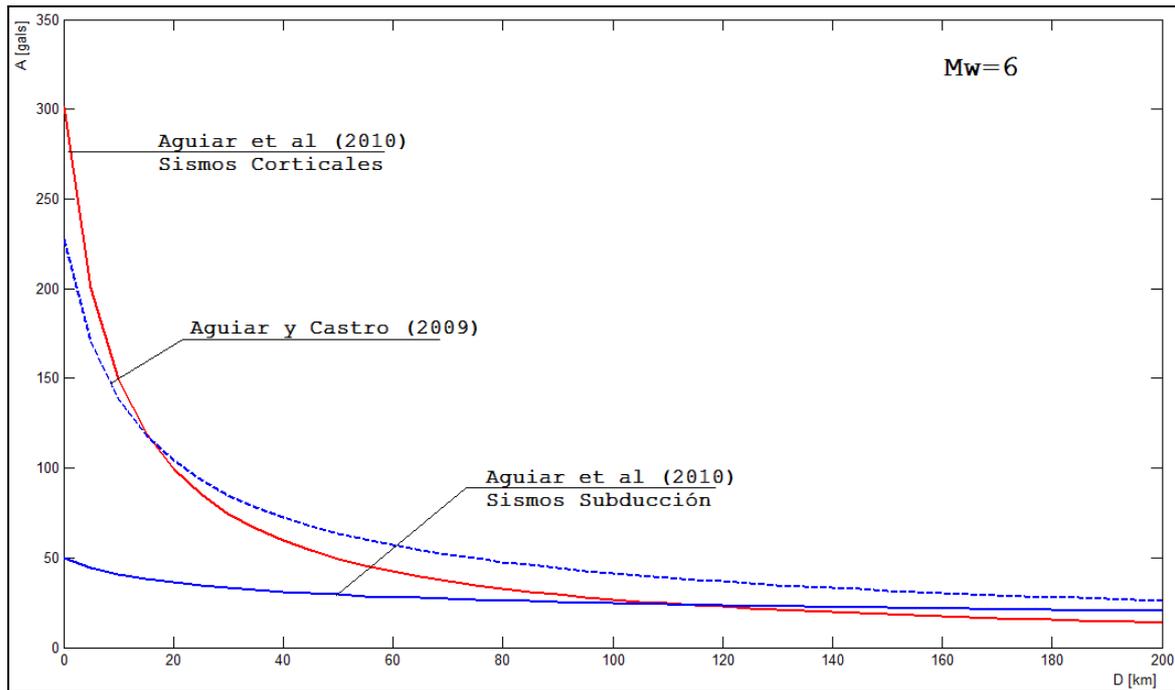


Figura 8 Leyes de atenuación halladas para el Ecuador. Sismo de magnitud $M_w = 6$.

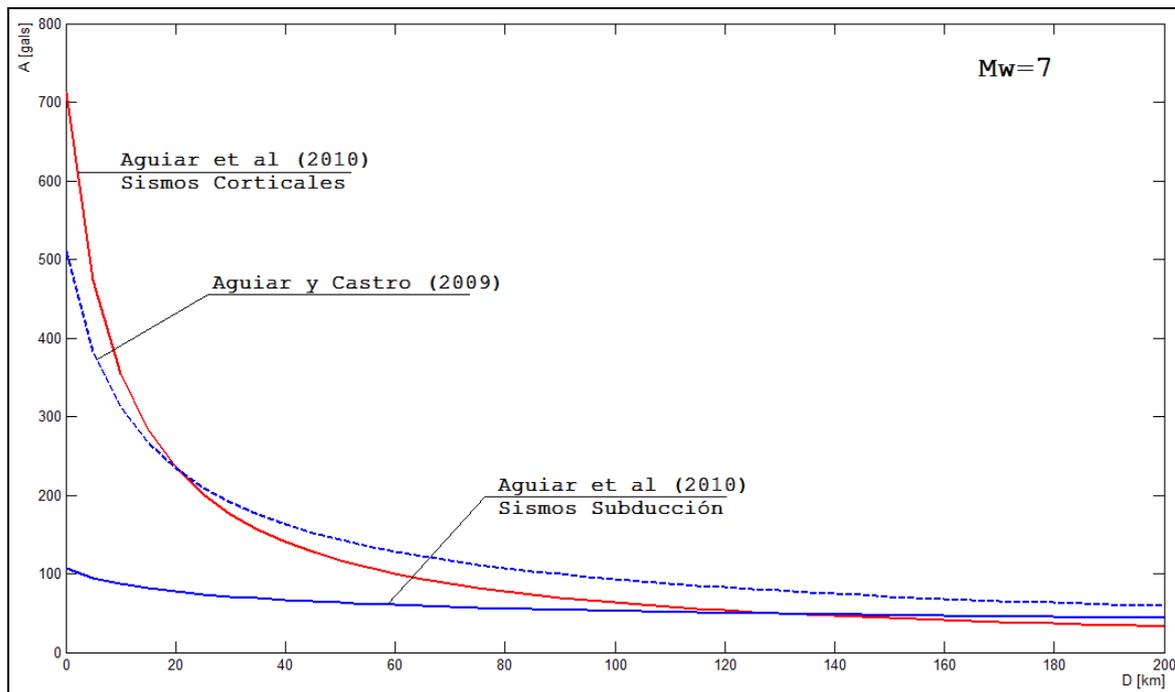


Figura 9 Leyes de atenuación halladas para el Ecuador. Sismo de magnitud $M_w = 7$.

5. LEYES HALLADAS A PARTIR DE ACELEROGRAMAS

En la zona Central de Chile se han dado terremotos muy fuertes, con magnitudes del orden de 8.5, como los registrados en 1575, 1647, 1730, 1822, 1906, 1985 y 2010. Siendo el último, el de mayor magnitud $M_w = 8.8$, mayor a la magnitud estimada del sismo Valdivia de

1906 que fue $M_s = 8.5$. Con esta pequeña introducción se pasa a describir brevemente el trabajo realizado por Ruiz y Saragoni (2005) para obtener leyes de atenuación para sismos interplaca (zona de contacto de las placas tectónicas) e intraplaca (sismos asociados a fallamiento cortical).

Ruiz y Saragoni (2005) encontraron las primeras Leyes de Atenuación para Chile, para aceleración, velocidad y desplazamiento, a partir de registros sísmicos. Para el efecto trabajaron con 15 sismos con magnitud mayor a 6 ($M_s > 6$). En estos 15 eventos se tuvieron 8 acelerogramas en *roca dura* $V_s > 1500$ (Suelo denominado S1) y 60 acelerogramas en *suelo duro* $1500 < V_s < 360$ (Suelo S2). Donde V_s es la velocidad de la onda de corte en m/s.

Las ecuaciones encontradas para las aceleraciones horizontales A_H (en gals), en un perfil de suelo S2, para fallamiento cortical es la ecuación (9) y para sismos de subducción son la (10) para un perfil de suelo S1 y la (11) para un perfil S2.

- **Sismos Intraplaca (Fallamiento Cortical)**

$$\ln(A_H) = 8.2532 + 1.2 * M - 2.16 * \ln(D + 80) \quad (9)$$

- **Sismos Thrust (Subducción)**

$$\ln(A_H) = 1.3863 + 1.3 * M - 1.43 * \ln(D + 30) \quad (10)$$

$$\ln(A_H) = 0.6931 + 1.28 * M - 1.09 * \ln(D + 30) \quad (11)$$

En la figura 10 se presentan las leyes de atenuación para sismos de magnitud 6 y 7, encontradas aplicando las ecuaciones de Ruiz y Saragoni (2005) con las ecuaciones halladas en este estudio. Las graficas superiores corresponden a magnitud 6 y las inferiores a magnitud 7; de igual manera las gráficas de la izquierda son para sismos corticales y los de la derecha para sismos de subducción.

Para los sismos asociados a fallamiento cortical las leyes de atenuación para Chile proporcionan valores superiores a las leyes de atenuación encontradas en este estudio. Se destaca que la ley de atenuación para Chile es para un perfil de suelo S2.

Para los sismos asociados con la subducción, la aproximación entre las leyes de atenuación de Ecuador y Chile tienen mejor aproximación. Para distancias menores a 20 km., las ecuaciones de Ruiz y Saragoni (2005) proporcionan mayores valores; para distancias mayores a 20 km., sucede lo contrario la ley de atenuación de Ecuador presenta mayores valores especialmente si se comprara con la Ley de Chile para un perfil de suelo S1.

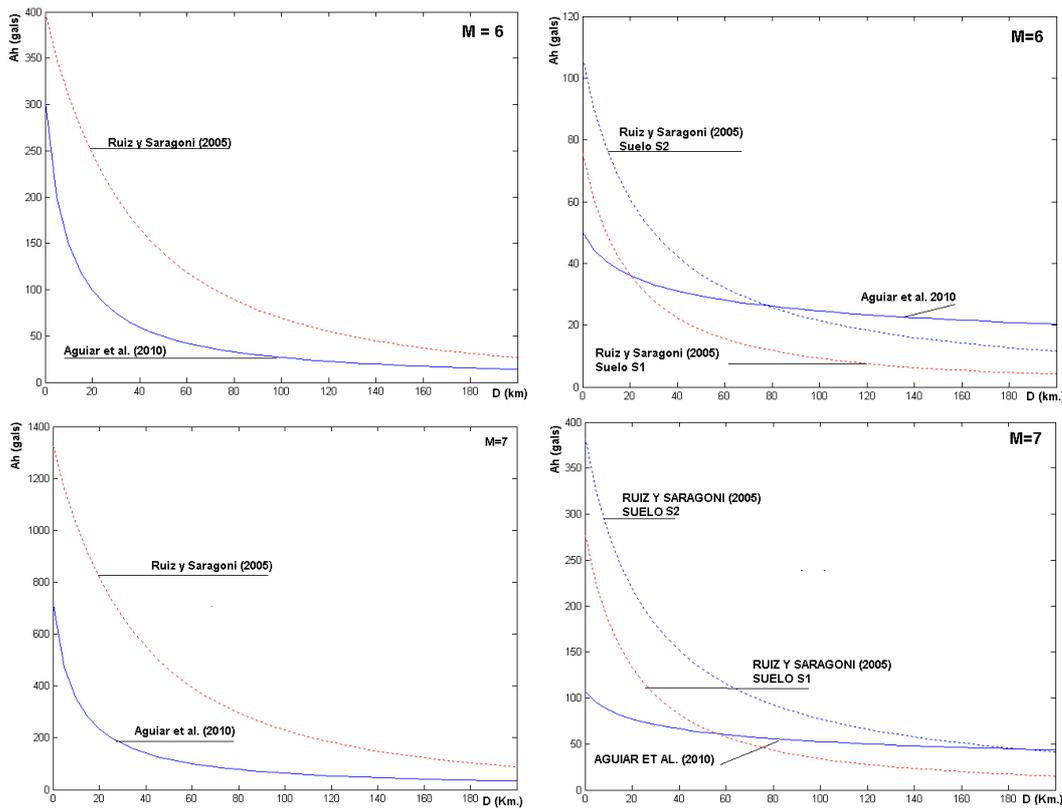


Figura 10 Comparación de leyes de atenuación de Chile y Ecuador. Primera Propuesta

6. LEYES DE ATENUACIÓN PARA ECUADOR SEGUNDA PROPUESTA

La segunda propuesta de Leyes de Atenuación para Ecuador, consiste en utilizar la ecuación propuesta por Saragoni *et al.* (1982) indicada en la tabla 6, que relaciona la aceleración máxima con la Intensidad en la escala de Mercalli Modificada y que se la copia a continuación.

$$\log(A_{\max}) = 0.345 I_{MM} - 0.222 \quad (12)$$

Se sustituye esta expresión, en las ecuaciones (2) y (3), encontradas en este estudio y se obtienen las Leyes de Atenuación para el Ecuador de la segunda propuesta. Estas Leyes son las siguientes:

- **Fallamiento Cortical**

$$\log(A_H) = -1.074 + 0.547 * M_w - 0.642 * \ln(D + 10) \quad (13)$$

- **Subducción**

$$\log(A_H) = -0.734 + 0.484 * M_w - 0.188 * \ln(D + 10) \quad (14)$$

En la figura 11 se comparan las leyes de atenuación halladas en este estudio, en la segunda propuesta, con las encontradas por Ruiz y Saragoni (2005). El formato de la figura 11

es similar al formato de la figura 10 por la que se omite la descripción del contenido de las mismas.

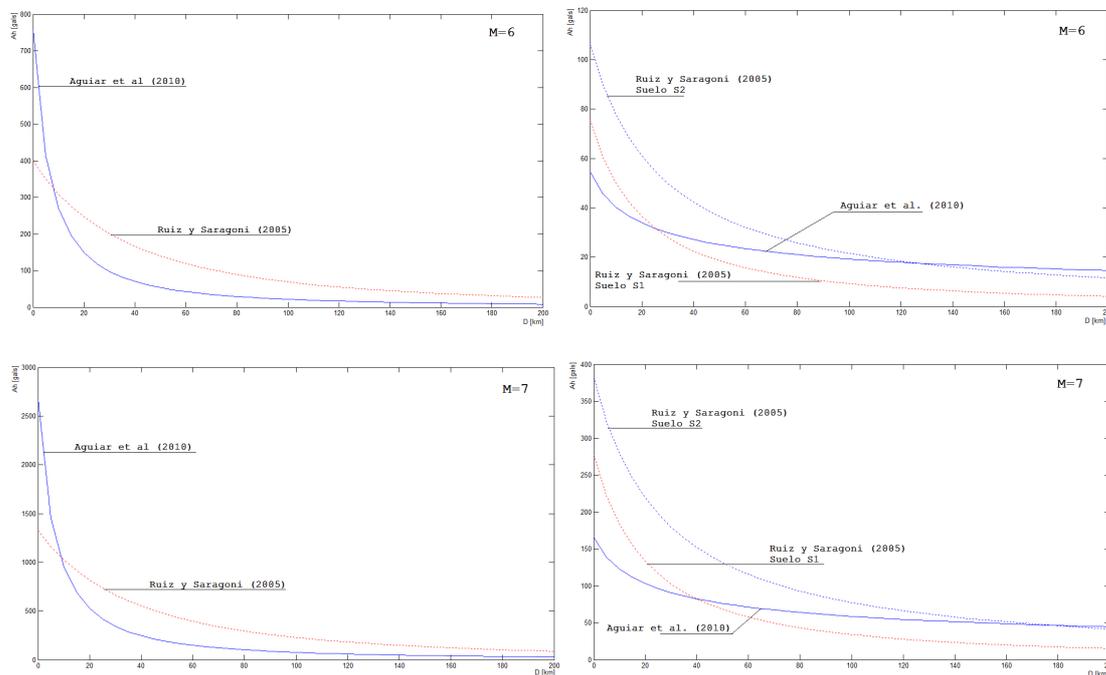


Figura 11 Comparación de leyes de atenuación de Chile y Ecuador. Segunda Propuesta.

La Ley de Atenuación hallada en la segunda propuesta se aproxima de mejor forma a la Ley hallada a partir de acelerogramas. Sin embargo las dos Leyes encontradas para el Ecuador son bastante buenas.

7. CONCLUSIONES

Lamentablemente en el Ecuador no se disponen de acelerogramas con valores mayores al 20% de la gravedad, con los cuales se podría encontrar una ley de atenuación para ser utilizada en estudios de peligrosidad sísmica empleando métodos determinísticos. Por esta razón se ha recurrido a información macrosísmica que en forma general dan una buena idea de cómo se atenuó el movimiento del suelo con la distancia.

Por otra parte, en base a 99 datos de aceleraciones máximas e intensidades de 7 eventos sísmicos registrados en los últimos 12 años en: Colombia, Perú y Chile se halló una relación entre aceleración máxima del suelo con intensidad, la misma que permitió pasar la Ley de Atenuación de Intensidades a una Ley de Atenuación de aceleraciones máximas del suelo. Con esta relación se obtuvo una Ley de Atenuación de la aceleración horizontal del suelo para sismos asociados a fallamiento local y para sismos de subducción

Las ecuaciones encontradas son las indicadas en las ecuaciones (2) y (3). La ecuación (2) encontrada en este estudio para fallamiento cortical se comparó con la ecuación (1) que fue obtenida por Aguiar y Castro (2009) cuando no se clasificó la información macrosísmica encontrado una muy buena aproximación. Pero ahora también se tiene una Ley de Atenuación para sismos de subducción.

Pero también se obtuvieron dos Leyes más de Atenuación, utilizando para el efecto la relación de Saragoni *et al.* (1982) con la cual se pasó de intensidad a aceleraciones horizontales. Estas dos nuevas Leyes de Atenuación para el Ecuador, encontradas de

información macrosísmica, fueron comparadas con leyes de atenuación halladas en Chile pero a partir de acelerogramas, encontrando una muy buena aproximación tanto para sismos asociados a fallamiento cortical como para sismos de subducción.

En resumen, en este trabajo se ha hallado una relación que permite pasar de intensidades máximas a aceleraciones máximas, tema que se debe seguir trabajando en Países que no tenemos suficientes acelerogramas de sismos fuertes, por este motivo es que en el Anexo 1 se indica la base de datos.

Se ha presentado dos propuestas para obtener Leyes de Atenuación para el Ecuador, de las dos se recomienda la segunda ya que esta se aproxima mejor a las leyes de atenuación halladas a partir de registros sísmicos. Para esta segunda propuesta se tienen dos leyes una para fallamiento cortical y otra para subducción.

AGRADECIMIENTO

En este artículo se han utilizado dos trabajos del Dr. Rodolfo Saragoni, uno publicado hace aproximadamente 30 años y otro hace 5 años, lo cual demuestra la importancia de las investigaciones realizadas por este científico, de la Universidad de Chile.

El primero de los autores de este artículo, agradece al Dr. Rodolfo Saragoni, por los días que le dedicó para hablar sobre leyes de atenuación y peligrosidad sísmica, en el mes de septiembre de 2009 y por haber sido el gestor de que participe en la reunión de expertos en Peligrosidad Sísmica que se realizó en Buenos Aires, en el mes de octubre de 2009.

REFERENCIAS

1. Aguiar R., (2010), "Peligrosidad sísmica y espectro de diseño elástico para la Presa del Proyecto Chespi-Palma Real",
2. Aguiar R., Castro C., (2009), "Ley de atenuación para estudios de peligrosidad sísmica en el Ecuador", *Revista Ciencia. Escuela Politécnica del Ejército*, **12 (2)**, 122-145, Quito.
3. Aguiar R., (1999), *Sismo de Colombia. Eje Cafetero 1999*, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, 164 p., Quito.
4. Boroschek R., Comte D., Soto P., Leon R., (2006), "Registros del Terremoto de Tarapaca, 13 de junio de 2005", *Universidad de Chile-Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil-Departamento Geofísica*, 3-6p, Santiago-Chile. http://www.cec.uchile.cl/~renadic/red_archivos/r050613.pdf
5. Boroschek R., Comte D., Soto P., Leon R., (2007), "Informe Preliminar #4, Terremoto norte de Chile, 14 de noviembre de 2007", *Universidad de Chile-Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil-Departamento Geofísica*, Santiago-Chile.
6. Boroschek R., Comte D., Soto P., Leon R., (2010), "Informe Preliminar #3, Terremoto Centro Sur Chile, 27 de febrero 2010", *Universidad de Chile-Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil-Departamento Geofísica*, Santiago-Chile. <http://www.terremotosuchile.cl/>

7. INGEOMINAS (2008), "Aspectos sismológicos y evaluación preliminar de daños-Informe preliminar #2", Instituto Colombiano de Geología y Minas, INGEOMINAS, Bogotá, Colombia. http://seisan.ingeominas.gov.co/RSNC/pdfs/Info_quetame.pdf
8. INGEOMINAS, "Mapas de grandes sismos en Colombia", Instituto Colombiano de Geología y Minas, Bogotá.
<http://productos.ingeominas.gov.co/productos/OFICIAL/geoamena/amenasis/escmilln/pdf/Sishist1.pdf>
9. Gallego M., Ordaz M., (1999), "Construcción de leyes de atenuación para Colombia a partir de espectros fuentes de vibraciones aleatorias", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras* **45 (1)**, 45-66.
10. Gallego M., Sarria A., (2006), *El Concreto y los Terremotos. Conceptos, comportamiento, patología y rehabilitación*. Instituto del Concreto, 301 p., Bogotá, Colombia.
11. García E., (2010), *Análisis sísmico del puente Carrizal y contribuciones a la Peligrosidad Sísmica del Ecuador*, Tesis de Grado. Carrera de Ingeniería Civil. Escuela Politécnica del Ejército, Quito.
12. Lomnitz C., (1974), "Global tectonics and earthquake risk", *Elsevier Scientific Publishing Company*.
13. Murphy J. and O'Brien L., (1977), "The correlation of peak ground acceleration amplitude with seismic intensity and other physical parameters", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **Vol 67**.
14. Ojeda A., Bermúdez M., (2005), "Respuesta sísmica de Cali durante el sismo de Pizarro del 15 de noviembre de 2004", *Instituto Colombiano de Geología y Minas, Bogotá*.
http://bdrsnc.ingeominas.gov.co/publicaRNAC/PUBLICACIONES/GEOLOGIA_2005/Sismo_Pizarro_2004.pdf.
15. Ruiz S., Saragoni R., (2005), "Fórmulas de atenuación para la subducción de Chile considerando los dos mecanismos de sismo génesis y los efectos de suelo", *IX Jornadas, ACHISINA 2005. Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Antisísmica. Universidad de Concepción*, 15 p., Concepción, Chile.
16. Salcedo E., Alvarado C., (2007), "Intensidades del sismo de Pizarro-Chocó del 15 de noviembre de 2004 en Cali-Colombia", *Revista Épsilon No.9*, 57-72 p., Bogotá-Colombia.
17. Salinas R., Lázares B., (2005), "Análisis de los acelerogramas registrados en las ciudades de Arequipa, Moquegua y Tacna correspondientes al sismo de Tarapaca del 13 de junio de 2005", *Centro de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID)*, 2-4p. http://www.cismid.uni.edu.pe/descargas/redacis/redacis01_a.pdf
18. Saragoni R., Crempien J., y Ayala R., (1982), "Características experimentales de los movimientos sísmicos sudamericanos", *Revista del IDIEM*, **21 (2)**, 67-86, México.
19. Sponheuer W. (1960), *Methoden zur Herdtiefenbestimmung in der Makroseismik* (Methods for depths estimation in macroseismic), *Freiberger Forschungs-Hefte C-88*, 117 p., Akademie Verlag Berlin.
20. Tavera H., (2008), "El Terremoto de Pisco(Perú) del 15 de agosto de 2007", *Instituto Geofísico de Perú, Lima-Perú*.

21. Trifunac M., Brady A., (1975), "On the correlation of seismic intensity scales with the Peak of recorded strong ground motion", Bulletin of the Seismological Society of America, **Vol 75**.

ANEXO 1

Datos con los cuales se halló una relación entre Aceleraciones e Intensidades

Sismo	Fecha	Mw	h (km)	Aceleraciones máximas(gals)																
				IX	VIII	VII	VI-VII	VI	V-VI	V	IV	III	II							
Colombia	15/11/2004	7,2	<33			54,6														
						19,3														
						17,9														
						50,5														
						61,5														
						24,7														
						38,3														
						108,5														
						39,5														
						46,5														
		67,5																		
		63,4																		
Chile	13/06/2005	7,9	117,0				259,0	418,9	66,7	167,8	66,0	65,0								
							211,9	65,7		183,4	53,0	128,0								
							237,4			157,9	62,0									
							709,3			319,8										
										305,1										
										87,3										
										297,2										
										112,8										
										19,6										
										90,0										
						116,0														
Chile	14/11/2007	7,7	60,0		400,2	91,0		48,9												
						390,4		82,8												
								74,1												
								59,8												
Perú	15/08/2007	7,9	26			272,0		78,7	58,4											
						488,0		54,1	25,3											
								74,5												
										104,0										

								85,3									
								67,0									
								55,0									
								58,7									
								54,9									
								22,1									
								20,6									
Colombia	24/05/2008	5,9	4,0									71,8	3,5	4,2			
														605,6	3,4		
															48,2		
															37,7		
															6,5		
															23,9		
															6,4		
															4,6		
															4,3		
															11,8		
											7,1						
Chile	27/02/2010	8,8	47,4	462,1	161,9			90,4									
					231,5												
					551,3												
					289,4												
					260,0												
Colombia	25/01/1999	6,2 (M _L)	<15		446,7			8,0			12,0	1,9					
					95,8			6,8					1,6				
					73,6								3,7				
					99,1								4,8				
					63,3								2,8				
					97,4								2,9				
					28,0								5,3				
					25,6								7,1				
					57,5												
					182,2												

Los datos del sismo de Colombia de 2004 fueron obtenidos de Salcedo y Alvarado (2007) y de Ojeda y Bermúdez (2005). Para el sismo de Chile de 2005 las referencias son: Boroschek *et al.* (2006) y Salinas y Lázares (2005). Para el sismo de Chile de 2007, la fuente es Boroschek *et al.* (2007). En el sismo de Perú de 2007, la referencia es Tavera (2008). La fuente del sismo de Colombia de 2008 es INGEOMINAS (2008). La referencia del sismo de Chile de 2010 es Boroschek *et al.* (2010). Finalmente, las citas bibliográficas del sismo que afectó al eje cafetero de Colombia en 1999 son: Gallego y Ordaz (1999); INGEOMINAS.

ANÁLISIS SÍSMICO EN SENTIDO LONGITUDINAL DEL PUENTE SUR QUE TIENE AISLADORES FPS CON CEINCI-LAB. COMPARACIÓN ENTRE DOS MODELOS.

Roberto Aguiar Falconí, Darwin Carrera Ortíz

Centro de Investigaciones Científicas
Escuela Politécnica del Ejército
raguiar@espe.edu.ec

RESUMEN

Se presentan dos modelos numéricos de análisis sísmico para puentes con aisladores de base tipo FPS (Frictional Pendulum System). En los dos modelos los pilotes son modelados con elementos finitos lineales con masa uniforme distribuida; los estribos con elementos finitos rectangulares concentrando las masas en puntos discretos seleccionados; el suelo que rodea a los pilotes es modelado con resortes con comportamiento no lineal en base a la curva carga deformación del suelo.

En el modelo 1 no se considera el la presencia del suelo que se encuentra en la parte exterior de los estribos y solo se considera que el FPS trabaja como un resorte de rigidez k_b . En el segundo modelo se toma en cuenta el suelo que está en los lados de los estribos, mediante una malla de elementos finitos y los FPS son modelados como resortes de rigidez k_b y amortiguamiento viscoso c_b . La rigidez k_b fue obtenida en función del período objetivo de la estructura, del radio de curvatura del FPS y de la carga que gravita sobre el FPS. El factor de amortiguamiento c_b fue obtenido experimentalmente de las curvas de histéresis de un FPS.

Los dos modelos fueron comparados realizando el análisis sísmico del Puente Sur, que forma parte del grupo de puentes construidos sobre el estuario del río Esmeraldas con aisladores de base FPS.

Por otra parte se presentan los nuevos programas que han sido implementados para el software **CEINCI-LAB**.

ABSTRACT

Two numeric models of seismic analysis are presented for bridges with insulators of base type FPS (Frictional Pendulum System). In the two models the piles are modeled with lineal finite elements with distributed uniform mass; the stirrups with rectangular finite elements concentrating the masses on selected discreet points; the floor that surrounds to the piles is modeled with springs with non-linear behavior based on the curve it loads deformation of the floor.

In the pattern 1 are not considered the presence of the floor that is in the external part of the stirrups and alone it is considered that the FPS works as a spring of rigidity. k_b In the second model he/she takes into account the floor that is in the sides of the stirrups, by means of a mesh of finite elements and the FPS they are modeled as springs of rigidity k_b and viscous reduction. c_b The rigidity was k_b obtained in function of the objective period of the structure, of the curvative radius of the FPS and of the load that gravitates on the FPS. The factor of reduction was c_b obtained experimentally of the curves of hysteresis of a FPS.

The two models were compared carrying out the seismic analysis of the South Bridge that is part of the group of built bridges on the estuary of the river Esmeraldas with base insulators FPS.

On the other hand the new programs are presented that have been implemented for the **CEINCI-LAB** software.

1. DESCRIPCIÓN DE PUENTE

El Puente Sur, es otra de las estructuras que el Cuerpo de Ingenieros del Ejército ha construido en el estuario del río Esmeraldas con aisladores de base tipo péndulo de fricción FPS (Frictional Pendulum System). Es un puente que tiene dos estribos tipo cajón en sus extremos y dos pilas centrales, cubriendo una luz de 160 m.; en la figura 1 se muestra una vista longitudinal del puente, se aprecia que las luces exteriores son de 50 m., y la luz central es de 60 m.

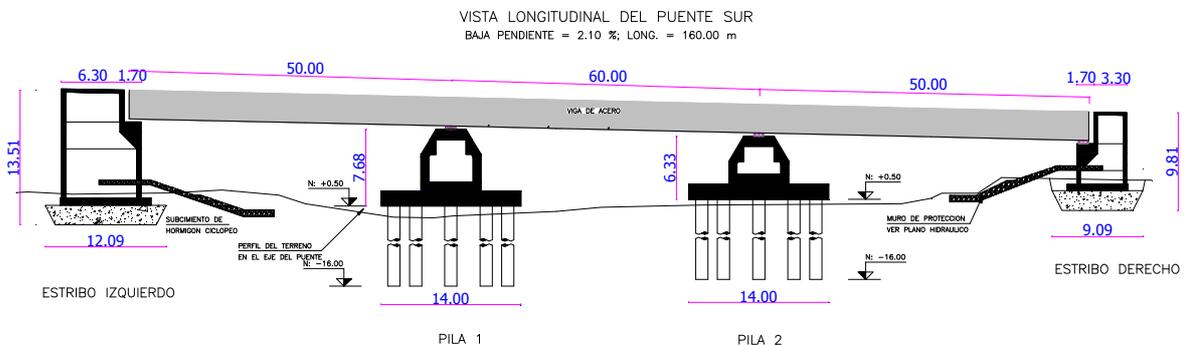


Figura 1 Vista longitudinal del puente Sur.

El estribo izquierdo se halla sobre una cimentación de hormigón ciclópeo de 2.0 m., de alto, con una dimensión en planta de 12.0 m., por 21.0 m., aproximadamente ya que la forma es trapezoidal como se ve en la figura 1. Sobre el hormigón ciclópeo se encuentra una losa maciza de hormigón armado de 0.70 m., de alto, que vendría también a ser parte de la cimentación; las dimensiones de esta viga en planta son de 8.20 m., por 19.10 (redondeando las cantidades). Sobre esta losa maciza viene el cajón propiamente dicho cuyas paredes interiores son de 0.30 m., y las paredes exteriores son de 0.35 m. En el sentido de la dimensión larga existen 3 paredes interiores y dos paredes exteriores; en el sentido de la dimensión corta las paredes son de 0.30 m. Estas paredes son las que forman las celdas del estribo que luego son rellenas con material pétreo. En la figura 2, a la izquierda se muestran las paredes cajón a las que se hace referencia y a la derecha se muestra la viga trapezoidal sobre la que se

apoyan los aisladores FPS, para el modelo numérico de cálculo la viga trapezoidal se ha convertido en una viga rectangular.

El estribo derecho es similar al estribo izquierdo pero con dimensiones más pequeñas, así la losa que se encuentra sobre la base de hormigón ciclópeo es de 0.60 m., de alto. La altura total del estribo derecho es 10.15 m., mientras que la altura total del estribo izquierdo está por los 13.0 m., en los dos casos se ha incluido los 2 m., de alto de hormigón ciclópeo que está bajo tierra.

Los dos apoyos centrales que se observan en la figura 1, tienen la misma concepción estructural pero con dimensiones diferentes. Cada uno de estos apoyos descansa sobre 10 pilotes pre-barrenados de 1.22 m., de diámetro, hincados a 17 m., de profundidad y colocados en forma circular en un diámetro de 14 m.

Sobre los pilotes se encuentra la denominada *viga cabeza*, que en realidad es una losa maciza de 1.50 m., de alto, y tiene un diámetro de 14 m. Sobre esta *viga cabeza* se halla la pila circular que es maciza en una altura de 1.0 m., tiene un diámetro de 6 m., luego esta pila se convierte en una pila hueca con un diámetro interior de 4.80 m., de tal manera que las paredes de la pila tienen un espesor de 0.60 m.; en la parte superior ésta pila es trapezoidal y al final se tiene una viga superior de las siguientes dimensiones en planta: 3.00 X 16.60 m., el alto de esta viga es de 1.0 m.

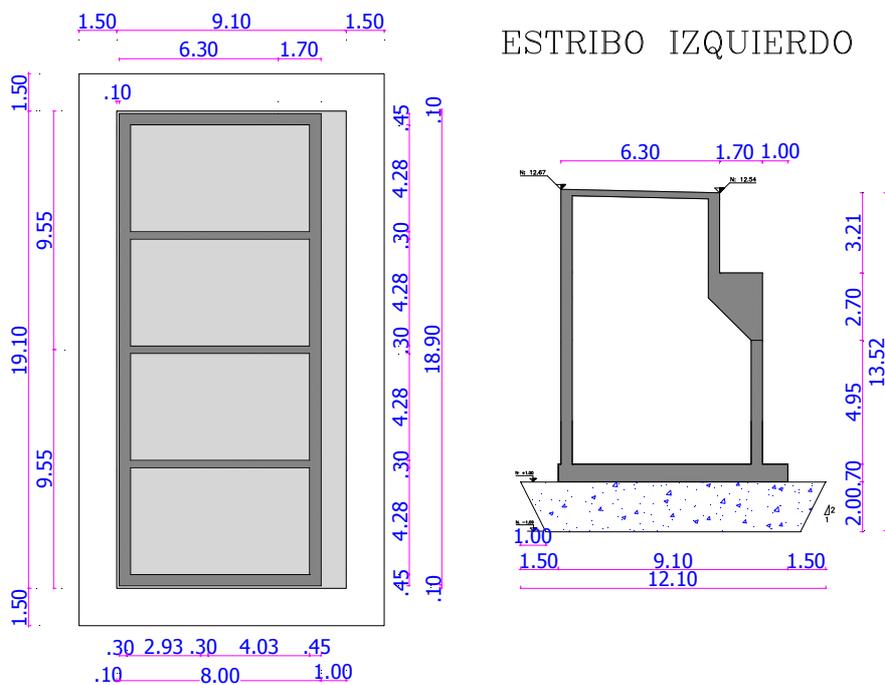


Figura 2 Vista en planta y un corte interior de estribo izquierdo.

En la figura 3 se describe en forma gráfica el puente Sur, en la parte superior izquierda se aprecia uno de los estribos tipo cajón, durante su construcción, en el cual se han colocado los tres aisladores FPS. En la parte superior derecha se aprecian las paredes del estribo, en su parte posterior.

En las fotografías de la figura central se observa las 6 vigas de acero tipo **I** que soportan la superestructura del puente. Los FPS están en la mitad de estas vigas longitudinales, claro está que sobre los FPS se encuentra una viga transversal tipo **I** que se denomina diafragma. En la fotografía central derecha se ve mejor que el FPS se encuentra en la mitad de las vigas longitudinales.

En la parte inferior de la figura 3 se observan las pilas centrales del puente, a la izquierda en el proceso constructivo y a la derecha cuando estaba terminada. A la izquierda se ven las seis vigas de acero que cubren dos luces exteriores de 50 m., y una luz central de 60 m. En la fotografía inferior derecha se aprecia el sitio en el cual se unieron las vigas para cubrir la luz de 160 m., se aprecia en la viga de acero la junta vertical.

En la figura inferior derecha se aprecia los cabezales de los pilotes que tienen una forma circular, la pila circular de 6 m., de diámetro exterior y la forma como se reduce esta sección hasta llegar a la viga superior de 3.0 m por 16.60 m.

Antes de presentar aspectos del modelo numérico de cálculo, es importante presentar aspectos constructivos que se deben tener en cuenta en estructuras con aisladores de base. Lo importante es tener en cuenta que los aisladores se van a mover bastante (del orden de los 20 a los 30 cm., ante un sismo muy fuerte) y que no deben encontrar impedimentos durante este movimiento. Se recuerda que la disipación de energía durante un sismo severo se va a dar en los FPS. Aguiar *et al* 2008., Constantinou (1990), Almazán (2001).



Figura 3 Descripción gráfica del puente Sur.

A la izquierda de la figura 4 se ve la viga de acero, una de las paredes del estribo cajón y en la parte superior se encuentra la losa del tablero del puente. Con una flecha se señala que entre la pared del estribo y la losa existe una separación de más de 3 cm., esto es para que pueda moverse libremente el tablero y no exista fricción con las paredes del cajón del estribo.

Ahora, a la derecha de la figura 4 se ve que entre el tablero del puente y el estribo se ha dejado una junta de construcción de 40 cm., dimensión inusual con respecto a los puentes que se construyen sin aisladores de base. Nuevamente esto es debido a la presencia del aislador, cuyo funcionamiento se indica en el próximo apartado. La tapa junta es una placa de acero.



Figura 4 Detalles constructivos relacionados con los FPS.

2. FUNCIONAMIENTO DE LOS FPS

Existen tres generaciones de FPS, el primero data de los años noventa en el cual se tiene una superficie cóncava, un deslizador y una superficie recta. Zayas *et al.* (1989). La segunda generación de los FPS es de finales del siglo XX y de principios del siglo XXI, en el cual se tiene doble curvatura y un deslizador. Fenz y Constantinou (2006).

Los de la tercera generación, corresponde al utilizado en los puentes de Esmeraldas, son dos aisladores de doble curvatura en uno solo dispositivo. En la figura 5 se aprecia uno de ellos, se ven las superficies cóncavas que son de acero inoxidable muy bien pulidas para permitir del deslizamiento del dispositivo interior que también tiene dos superficies de acero cóncavas y en la parte central se tiene el deslizador. Ante movimientos sísmicos de pequeña intensidad trabaja únicamente el aislador interior y ante movimientos sísmicos muy fuertes trabajan los dos deslizadores el interior y el exterior de éste. Los aisladores vienen recubiertos por una goma que impide la entrada de polvo que podrían impedir el movimiento del deslizador.

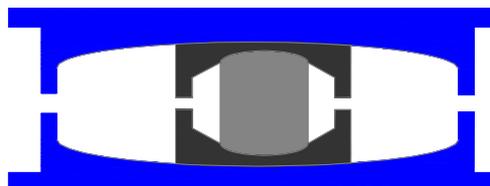


Figura 5 Aislador FPS utilizado en los puentes de Esmeraldas

En la figura 6 se pretende explicar el funcionamiento de los FPS, en sentido transversal al eje del puente, por ello se ha dibujado un estribo con los tres FPS. Se presentan dos flechas, la superior corresponde a las fuerzas generadas por el movimiento sísmico y la inferior son las

fuerzas que se generan en la superficie de contacto del deslizador. En otras palabras cuando hay un sismo el deslizador se mueve pero internamente se generan fuerzas de sentido contrario que se oponen al movimiento. En forma muy elemental se puede decir que estas fuerzas de fricción valen νN . Donde ν es el coeficiente de fricción que existe entre el deslizador y la superficie cóncava de acero; este coeficiente es función de la velocidad de deformación y de la presión. N es la fuerza normal; para pequeñas deformaciones se tiene que la fuerza normal es igual al peso que gravita sobre el FPS.

En este artículo se modela el FPS como un resorte horizontal que tiene una rigidez k_b , la misma que se halla de la siguiente manera: i) se determina la carga vertical que gravita en el aislador; ii) se encuentra el radio de curvatura del FPS, con la siguiente expresión:

$$T = 2 \pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (1)$$

Donde T es el período objetivo que se desea tenga el sistema de aislación; R es el radio de curvatura; g es la gravedad. iii) se halla la rigidez k_b con la fórmula siguiente. Aguiar *et al.* (2008).

$$k_b = \frac{m g}{R} \quad (2)$$

Siendo m la masa que se obtiene dividiendo el Peso que se transmite al aislador para la gravedad g .

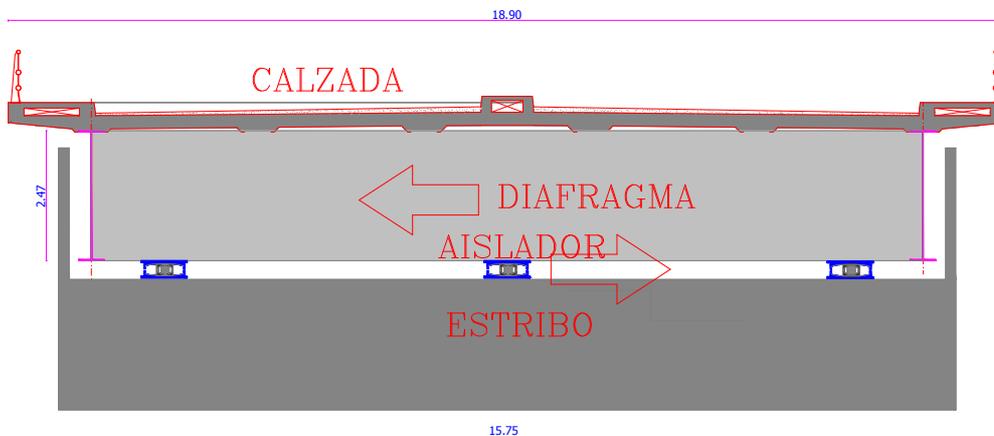


Figura 6 Esquema de trabajo, en sentido transversal, de los FPS de un estribo.

El período objetivo T se impone el calculista. En el caso de Esmeraldas este período fue de 3 s.; Se trabaja con períodos que están entre los 2 y 3 segundos, ya que para esa zona del espectro de diseño sísmico las ordenadas espectrales son bajas.

Al ser bajas las ordenadas espectrales; la fuerza que se transmite a la estructura por efecto del sismo es baja; esta es una de las ventajas de utilizar aisladores de base, en general. Otra de las ventajas es que al trabajar con períodos altos se está flexibilizando a la estructura con lo cual el aislador filtra las altas frecuencias del sismo, las que producen daño.

3. NUEVOS PROGRAMAS DE CEINCI-LAB

Con el desarrollo de esta investigación se han incorporado nuevos programas a **CEINCI-LAB** que son específicos para el análisis sísmico del puente Sur de Esmeraldas pero que pueden ser ligeramente modificados y complementados para el análisis estático o sísmico de otro tipo de estructuras, por este motivo se indica su uso de algunos de ellos.

3.1 Generación de mallas en vigas continuas

Lo más complicado en elementos finitos es la generación de la matriz que contiene a los vectores de colocación de una estructura. Por este motivo se desarrolló un programa denominado **vc_acero_tres_vanos_ef** que obtiene las coordenadas generalizadas de cada uno de los nudos y la matriz de vectores de colocación de cada uno de los elementos para una viga continua de 3 vanos.

En este programa los nudos se numeran de izquierda a derecha y de abajo hacia arriba, lo propio sucede con los elementos. Por otra parte los apoyos son rodillos, de tal manera que existe un grado de libertad horizontal en cada apoyo.

Como está orientado al análisis sísmico, se concentró las masas en los ejes de los apoyos como se aprecia en la parte inferior de la figura 7. De tal manera que las coordenadas principales son las horizontales y que están asociadas con las masas concentradas.

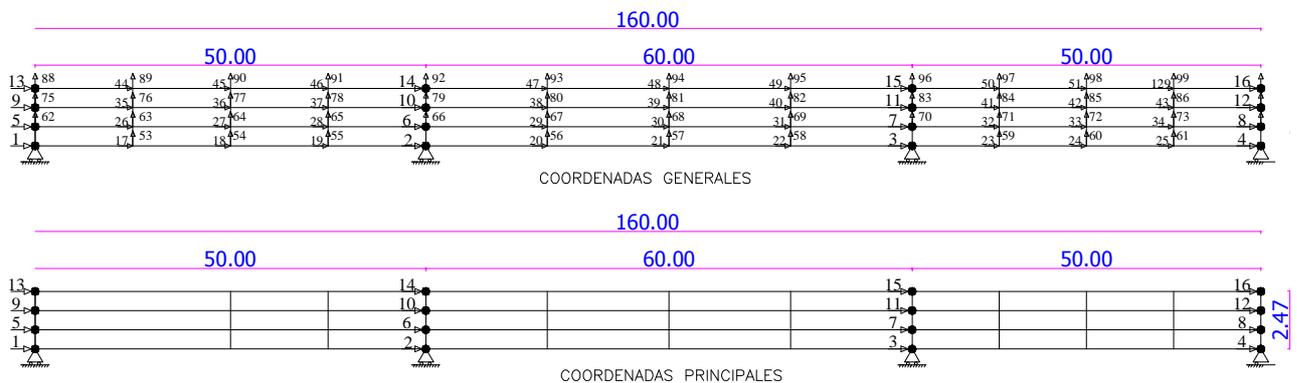


Figura 7 Grados de libertad del programa **vc_acero_tres_vanos_ef**

Una vez que se numeran las coordenadas principales, se pasa a numerar todas las demás coordenadas horizontales de los nudos, como se indica en la parte superior de la figura 7, luego se numeran las coordenadas verticales.

El programa **vc_acero_tres_vanos_ef** reporta: la matriz que contiene a los vectores de colocación de cada uno de los elementos; el número total de grados de libertad y las coordenadas generalizadas de cada uno de los nudos.

El usuario de **CEINCI-LAB** solo tiene que indicar el número de elementos finitos en dirección X y en dirección Y, de un solo vano. El programa asume que este mismo número de elementos se consideran en los otros vanos. En la figura 7 se han considerado 4 elementos finitos en dirección X y 3 elementos finitos en dirección Y. Por cierto las dimensiones indicadas de los vanos corresponden a la viga del Puente Sur; la viga es de acero de 2.47 m., de alto.

3.2 Matriz de rigidez y de masas de las vigas de acero

El programa que halla la matriz de rigidez y de masas de las vigas de acero del puente Sur se denomina ***rigidez_viga_acero_PS***. El programa primero halla la matriz de rigidez de la viga continua, con todos los grados de libertad; luego condensa la matriz de rigidez a las coordenadas laterales indicadas en la parte inferior de la figura 7. Aguiar (2004). La matriz de masas encuentra también para el mismo sistema de coordenadas principales. El listado del programa es el siguiente.

```
function [KA,MA]=rigidez_viga_acero_PS
%
% Programa para encontrar la matriz de rigidez y de masa para análisis
% sísmico de viga superior de acero del Puente Sur.
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% XX          XX          XX          XX
%
% ----- 50 m.-----!----- 60 m. -----!----- 50 m.-----!
%
%      Roberto Aguiar
%      CEINCI-ESPE
%      Febrero de 2010
%-----
% Matrices de Rigidez y de Masas de Viga Superior de Acero
%-----
E=20000000.0; % Modulo de elasticidad del acero en T/m2
[X,Y,XP,YP]=coord_ef(180,3,160.0,2.47); %Coordenadas de Elementos Finitos
[VC,ngl,cg]=vc_acero_tres_vanos_ef(60,3);
for i=1:180*3; espe(i)=0.045*6; end % espesor medio por 6 vigas
[K]=rigidez_estructura_ef(VC,180,3,XP,YP,E,espe,0.20,ngl);
% Condensación de matriz de rigidez
for i=1:16; r1(i)=i; end; for i=1:ngl-16; r2(i)=16+i; end
Kaa=K(r1,r1);Kab=K(r1,r2);Kbb=K(r2,r2);
KA=Kaa-Kab*inv(Kbb)*Kab';
MA=zeros(16,16); %Matriz de masas
masa=160*2.47*0.045*7.85/9.8;MA(1,1)=MA(1,1)+masa/16;
MA(2,2)=MA(1,1);MA(3,3)=MA(1,1);MA(4,4)=MA(1,1);
MA(5,5)=MA(1,1);MA(6,6)=MA(1,1);MA(7,7)=MA(1,1);MA(8,8)=MA(1,1);
MA(9,9)=MA(1,1);MA(10,10)=MA(1,1);MA(11,11)=MA(1,1);MA(12,12)=MA(1,1);
MA(13,13)=MA(1,1);MA(14,14)=MA(1,1);MA(15,15)=MA(1,1);MA(16,16)=MA(1,1);
return
% ---end---
```

Como era de esperarse el programa llama a otros programas de la librería de **CEINCI-LAB**.

3.3 Matriz de rigidez y de masas de estribo izquierdo

En la figura 8 se indican las 28 coordenadas principales considerados para el estribo izquierdo. El programa ***rigidez_estribo_izquierdo_PSurDETALLADO*** encuentra la matriz de rigidez y de masas. Se trabajó con 13 Elementos Finitos (EF) en X y 2 EF en Y, en la cimentación de hormigón ciclópeo; el módulo de elasticidad empleado para este hormigón fue $E = 1264911 T / m^2$. Para la losa de hormigón armado que se halla encima y que tiene una altura de 0.70 m., se calculó con 9 EF.

Continuando, para arriba, se tiene el estribo formado solo por las paredes de hormigón armado, en una altura de 4.95 m., y un ancho de 7.28 m. Para este sector se consideró 8 EF en sentido X y 5 EF en sentido Y, en total 40 EF.

Para la viga que está bajo el FPS se calculó con 2 EF en X y 2 EF en Y, en total 4 EF. En la parte lateral izquierda de esta viga existen paredes de hormigón armado, este sector fue modelado con 6 EF en X y 2 EF en Y.

Luego hay todo un sector que tiene solo paredes de hormigón armado, esto fue calculado con 6 EF en X y 3 EF en Y. Las dimensiones de este sector del estribo es de 6.40 por 2.83 m. Finalmente se tiene la losa superior del estribo que constituye el tablero del puente y tiene 0.25 m., de alto, en este sector se consideró 6 EF en X y 1 en Y. El módulo de elasticidad del hormigón fue $E = 1870828 T / m^2$.

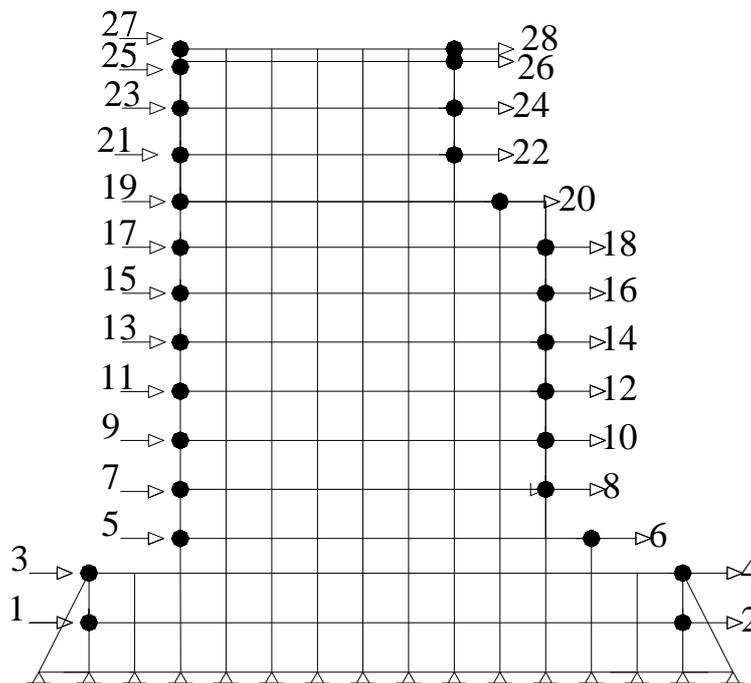


Figura 8 Coordenadas principales de estribo izquierdo.

3.4 Matriz de rigidez y de masas de apoyos

Como se había manifestado hay dos apoyos muy semejantes pero diferentes en sus dimensiones, para cada uno de ellos se elaboró un programa de computación para encontrar la matriz de rigidez y de masas; ***rigidez_apoyo1_central_PS*** es el nombre del primer programa para el apoyo que está más próximo al estribo izquierdo y ***rigidez_apoyo2_central_PS*** es el otro programa. El número de coordenadas principales del apoyo 1 es 56 y del apoyo 2 es 52. En los dos casos la última coordenada considerada como principal es una vertical asociada con la componente de desplazamiento vertical del punto en el cual se asienta el FPS. Esto con el propósito de a futuro incorporar modelos más sofisticados de análisis.

3.5 Matriz de rigidez y de masas de estribo derecho

El programa ***rigidez_estribo_derecho_PS*** encuentra la matriz de rigidez y de masas en coordenadas principales del estribo derecho. En este caso se tienen 22 coordenadas principales, las mismas que se indican en la figura 10.

Para los apoyos centrales, los pilotes fueron modelados con EF lineales con masa concentrada y para los estribos con EF rectangulares con dos grados de libertad por nudo. El marco teórico se presenta en el artículo anterior. Aguiar y García (2010).

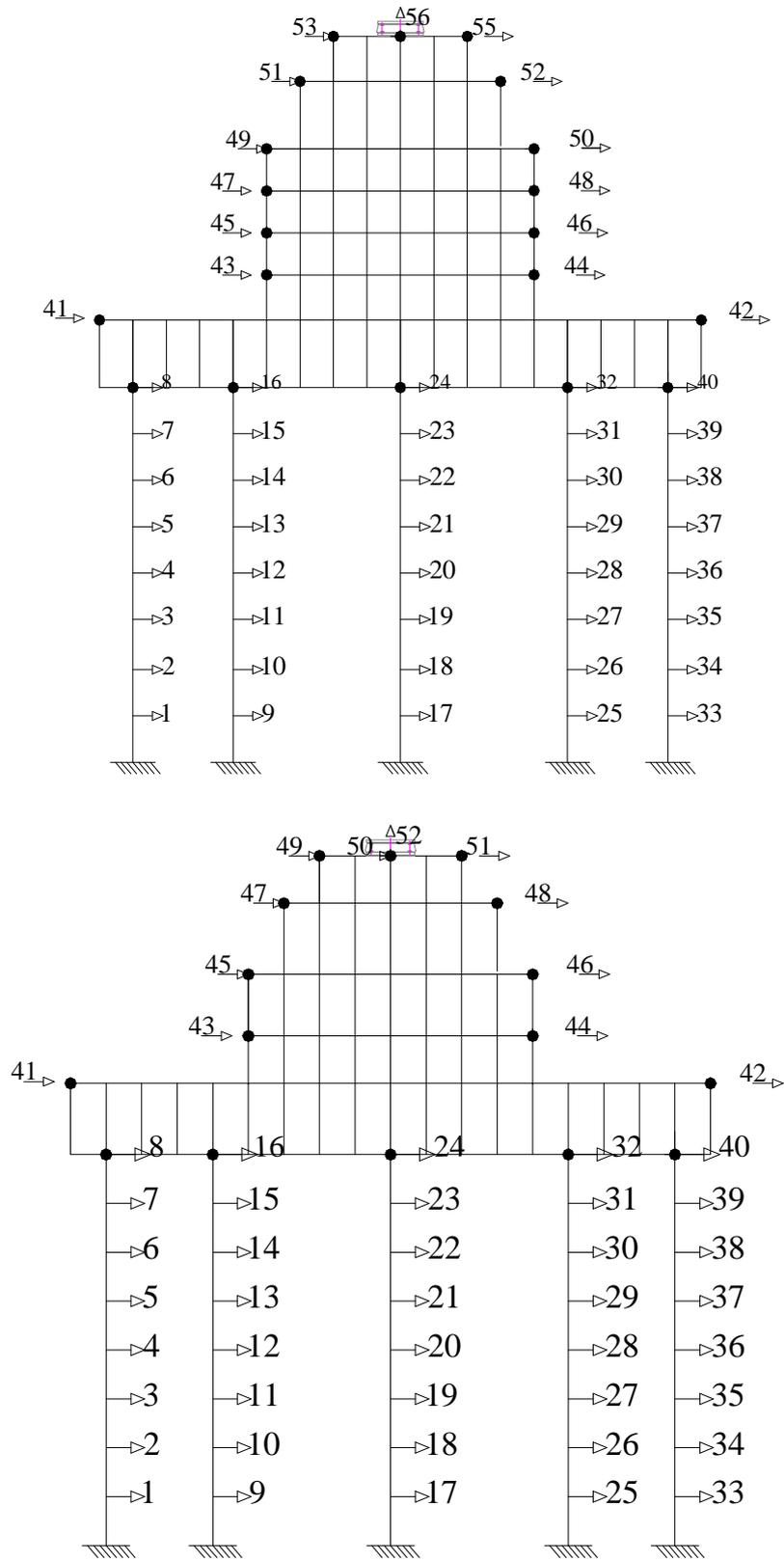


Figura 9 Coordenadas principales de los apoyos del puente.

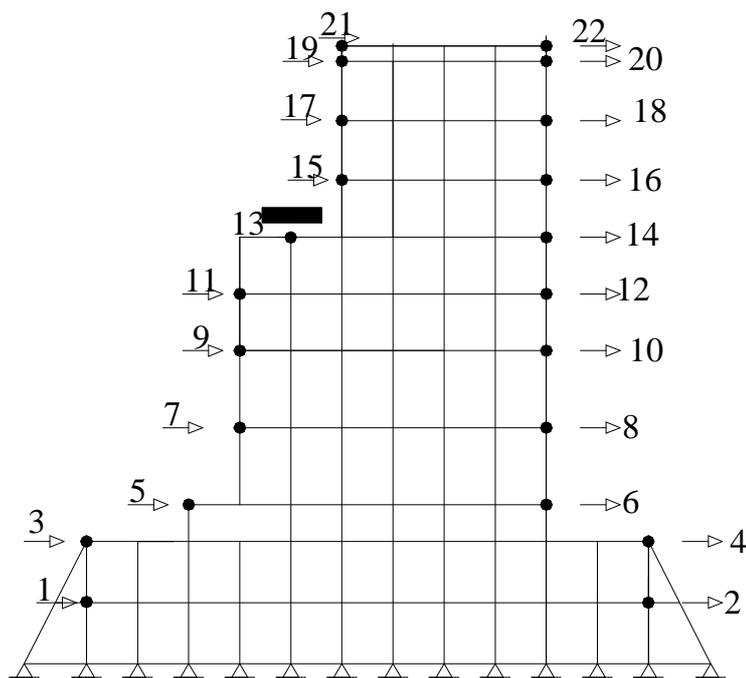


Figura 10 Coordenadas principales de estribo derecho.

4. ANÁLISIS SÍSMICO LONGITUDINAL CON MODELO 1

En la figura 11 se presentan los grados de libertad con los cuales se realiza el análisis sísmico en sentido longitudinal. Se tienen 176 coordenadas principales entre las que se incluyen dos coordenadas verticales en los apoyos centrales y son las coordenadas 84 y 136.

En este artículo el FPS es modelado como un resorte de rigidez k_b , hallado con la ecuación (2) y que actúa en los siguientes grados de libertad 159, 160, 161 y 162. En un futuro trabajo se modelará al FPS como un elemento pequeño, que está entre los apoyos y la viga.

El suelo que rodea a los pilotes es modelado, con resortes que actúan en los grados de libertad 29 a 68 para el apoyo 1 y 85 a 124 para el apoyo 2. La curva carga deformación utilizada para el suelo es la indicada en la figura 12. Aguiar *et al* (2010), Beltrán (2008). Se entiende que a partir de los 7 m., la curva carga deformación es la misma.

Con **CEINCI-LAB** se indica solo las propiedades del suelo de un eje de pilotes y el programa **genera_gdl_resortes** obtiene las propiedades de los demás ejes de pilotes de un apoyo. De tal forma que se debe dar como datos dos ejes de pilotes, el uno correspondiente al apoyo 1 y el otro eje de pilotes corresponde al apoyo 2.

La estructura en la forma analizada tiene un **período fundamental de 1.34 s.** Antes de finalizar la explicación del modelo 1 y pensando en el modelo 2 que se indica posteriormente se debe manifestar lo siguiente. El modelo 1 no considera la presencia del suelo que se encuentra al lado de los estribos en el movimiento sísmico que si considera el modelo 2. La otra diferencia es que el modelo 1 no considera el amortiguamiento del FPS que si considera el modelo 2. Se destaca una vez más que se está presentando un modelo aproximado para el comportamiento del FPS.

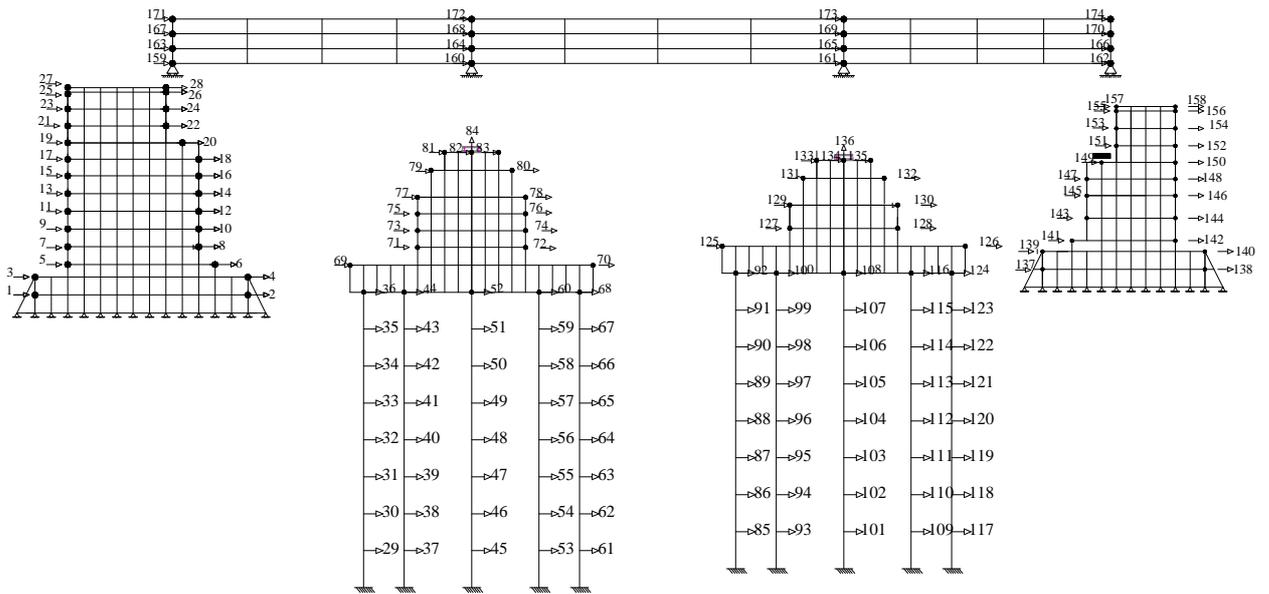


Figura 11 Grados de libertad considerados en el análisis sísmico longitudinal

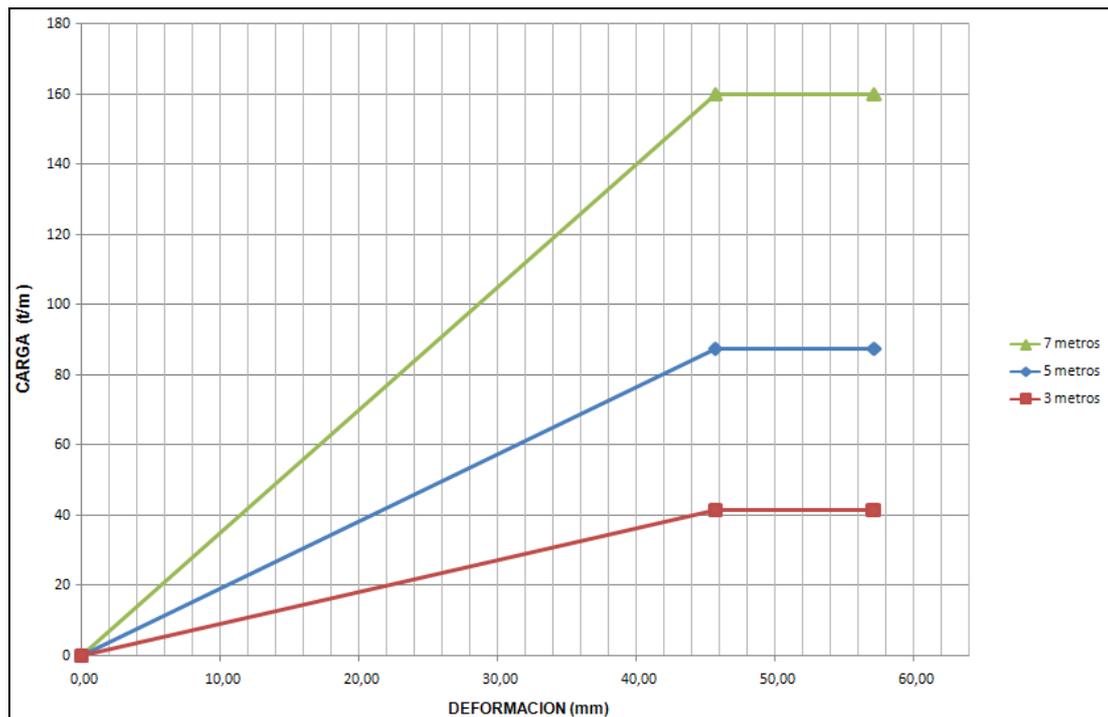


Figura 12 Modelo carga-deformación del suelo.

El sismo de análisis se indica en la figura 13 y corresponde a un acelerograma artificial que tiene una duración de 20 s., y que es compatible con el espectro del CEC-2000 para un perfil de suelos S3. A la derecha de la figura 13 se muestra el espectro de respuesta elástico hallado para 5 % de amortiguamiento.

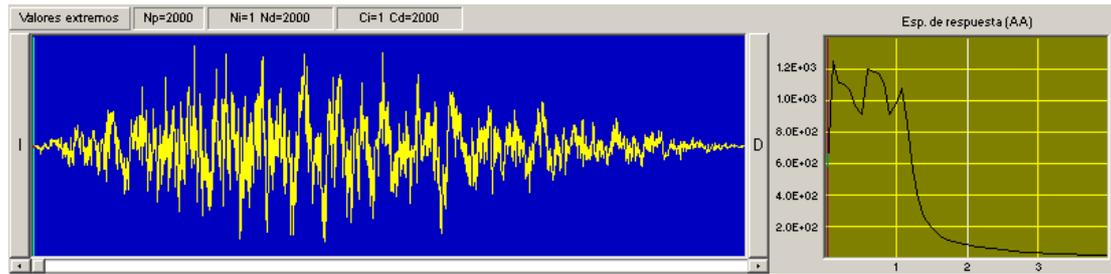


Figura 13 Acelerograma artificial y su espectro elástico.

5. RESULTADOS CON MODELO 1

En la figura 14 se muestra la respuesta en desplazamientos, en el estribo izquierdo; apoyo 1; apoyo 2; estribo derecho. En cada una de estas subestructuras se seleccionaron 4 puntos los mismos que están identificados por los grados de libertad (GDL). De acuerdo al GDL en la figura 11 se puede ver la ubicación del punto seleccionado.

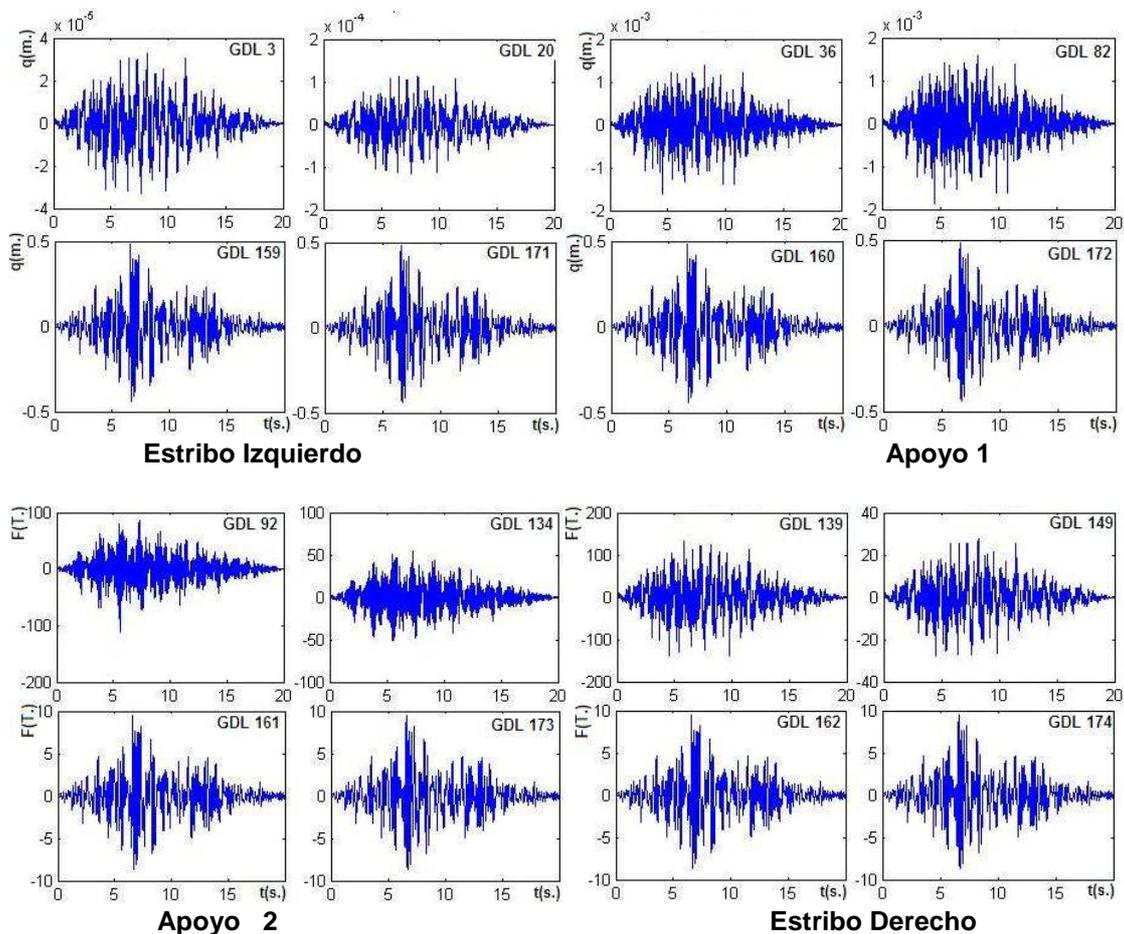


Figura 14 Respuesta de desplazamientos hallados con modelo 1.

Se presenta la respuesta a nivel de cimentación, en los estribos o a nivel de los pilotes en los apoyos centrales; ese es un punto. Luego interesa conocer los desplazamientos bajo los aisladores y sobre los aisladores, finalmente es interesante conocer los desplazamientos en la parte superior de la viga de acero. En la figura 14 se aprecia que los desplazamientos en la

cimentación o en los pilotes, son extremadamente bajos; lo propio sucede con los desplazamientos laterales bajo el FPS. Sobre los FPS los desplazamientos son altos y en la parte superior de la viga se mantienen éstos desplazamientos; es decir, los desplazamientos relativos del tablero con respecto al aislador son prácticamente nulos.

La respuesta a nivel de fuerzas horizontales se indican en la figura 15, para los mismos grados de libertad de la figura 14. Los cortantes sobre el aislador son bajos, el valor máximo es del orden de las 10 T., (era preocupación encontrar el cortante en este punto para ver la demanda sísmica que llega a los pernos de anclaje superior de los FPS). En la parte inferior de los FPS los cortantes son más altos pero ahí se tiene una gran viga de hormigón armado (los pernos de anclaje de los FPS están inmersos en esta gran viga).

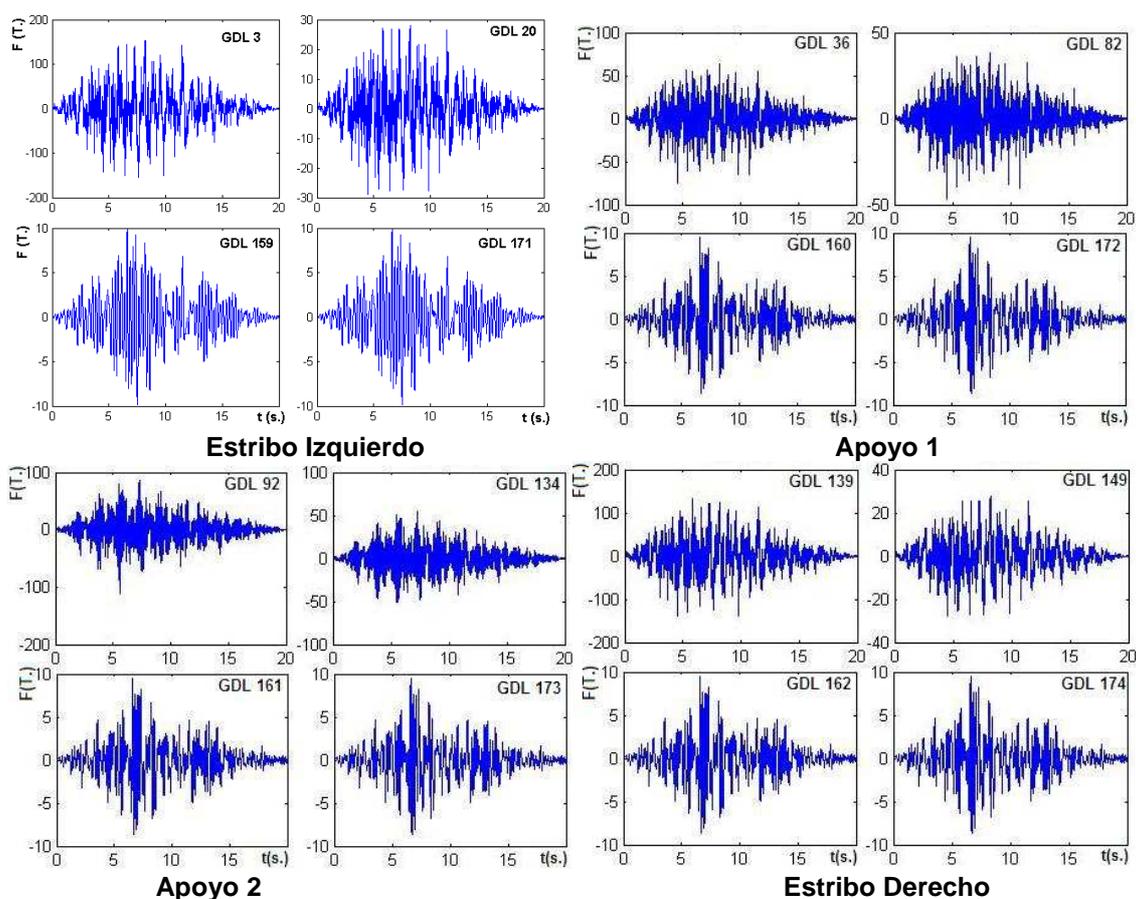


Figura 15 Respuesta de Fuerzas con Modelo 1

En la figura 16 se muestra la respuesta máxima en valor absoluto, en la cara externa del estribo izquierdo (gráficos de la parte superior) y en la cara externa del primer apoyo (gráficos de la parte inferior). Se presenta la respuesta de desplazamientos, a la izquierda y de fuerzas a la derecha.

Tanto los estribos como las pilas prácticamente no se desplazan horizontalmente hasta donde se encuentran los FPS, son los aisladores los que se desplazan notablemente y luego nuevamente aparece una recta vertical en los gráficos que están a la izquierda de la figura 16, lo que significa que no hay desplazamiento. Este comportamiento es debido a que con la presencia de los FPS el peso de la superestructura detiene los desplazamientos de la subestructura. Si no habría FPS los desplazamientos de las pilas centrales sería considerable. Curvas similares se obtuvieron para el apoyo 2 y el estribo derecho.

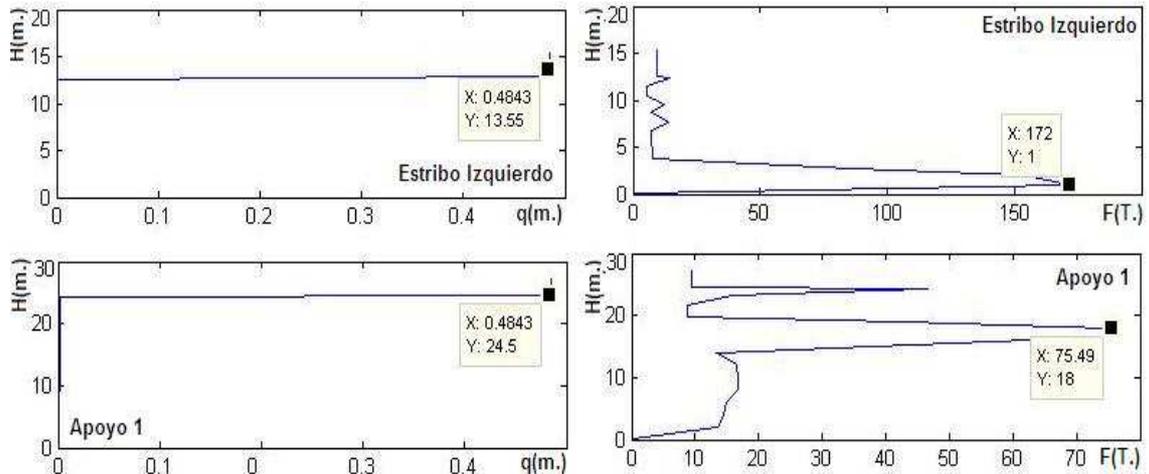


Figura 16 Respuestas máximas en estribo izquierdo y apoyo 1.

6. ANÁLISIS SÍSMICO LONGITUDINAL CON MODELO 2

En la figura 17 se muestran los dos modelos simplificados, utilizados para los FPS, a la izquierda se indica el modelo 1, descrito anteriormente y a la derecha el modelo 2, en que se incorpora el amortiguamiento del FPS, como viscoso.

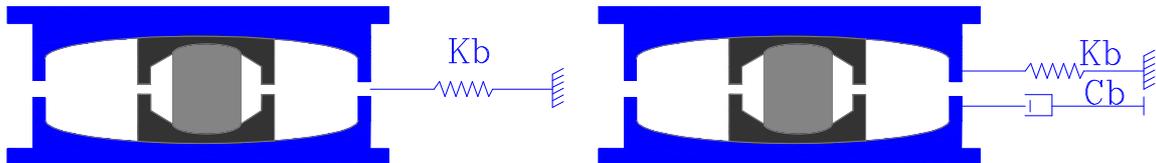


Figura 17 Modelos simplificados de los aisladores FPS

$$C_b = 2 \xi_b \sqrt{m_b k_b} \tag{3}$$

Donde ξ_b es el factor de amortiguamiento del aislador; m_b es la masa que gravita sobre el aislador y k_b la rigidez del FPS.

En la figura 18 se presenta la curva de histéresis de un aislador FPS, en el eje de las X se presentan los desplazamientos y en el eje de las Y, la fuerza aplicada. El factor de amortiguamiento ξ_b se obtiene de esta curva con la siguiente ecuación.

$$\xi_b = \frac{E_D}{4 \pi E_S} \tag{4}$$

Siendo E_D la energía disipada por el sistema inelástico y es igual área de un ciclo de histéresis; E_S es la energía elástica que absorbe el sistema. Aguiar (2003). En la figura 18, proporcionada por Landázuri (2009) se observa que el factor $\xi_b = 0.29$, para el aislador ensayado. Para ser un poco conservador se trabajó con $\xi_b = 0.25$.

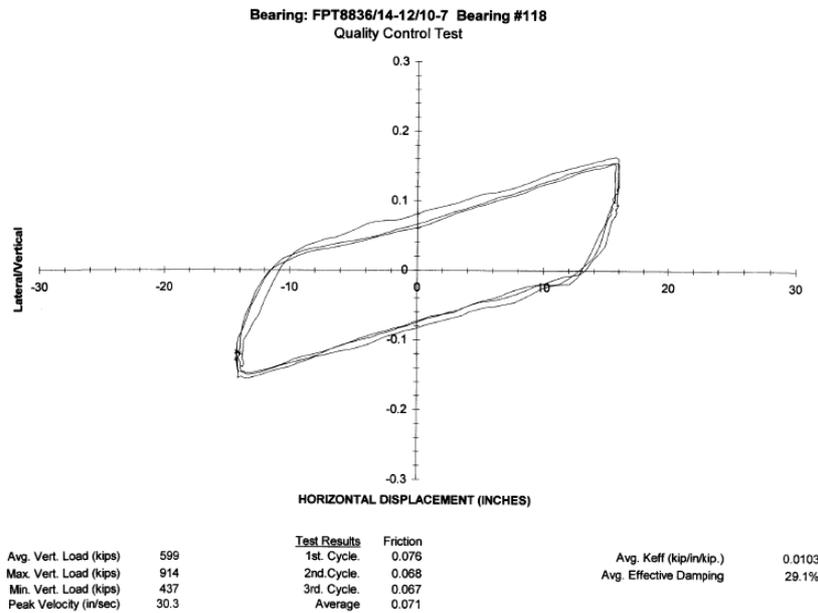


Figura 18 Curva de histéresis de un aislador FPS.

El modelo 2, incorpora también el suelo que se encuentra en la parte exterior de los estribos. Para esto se trabajó con un EF rectangular con dos grados de libertad por nudo, cuyas funciones de forma son las indicadas en la tabla 1.

Tabla 1 Funciones de forma para elemento finito rectangular.

Coordenada natural	Deformada elemental	Función de Forma
1	$u1$	$\phi_1 = 0.25(-s + 1)(-t + 1)$
	$v1$	$\phi_1 = 0.25(-s + 1)(-t + 1)$
2	$u2$	$\phi_2 = 0.25(s + 1)(-t + 1)$
	$v2$	$\phi_2 = 0.25(s + 1)(-t + 1)$
3	$u3$	$\phi_3 = 0.25(s + 1)(t + 1)$
	$v3$	$\phi_3 = 0.25(s + 1)(t + 1)$
4	$u4$	$\phi_4 = 0.25(-s + 1)(t + 1)$
	$v4$	$\phi_4 = 0.25(-s + 1)(t + 1)$

Donde s, t son las coordenadas naturales del EF que varía entre -1 y 1. Nótese que no se ha incorporado en el modelo la presión del agua, para ir paso a paso mejorando y enseñando los EF. Cook *et al.* (2002).

7. NUEVOS PROGRAMAS DE CEINCI-LAB

En la figura 19 se muestra el modelo numérico de cálculo del estribo izquierdo, incorporando la presencia del suelo. Las masas concentradas corresponden a las coordenadas principales indicadas en la figura 8. A la izquierda de estas masas se ha colocado el suelo con sus respectivos grados de libertad.

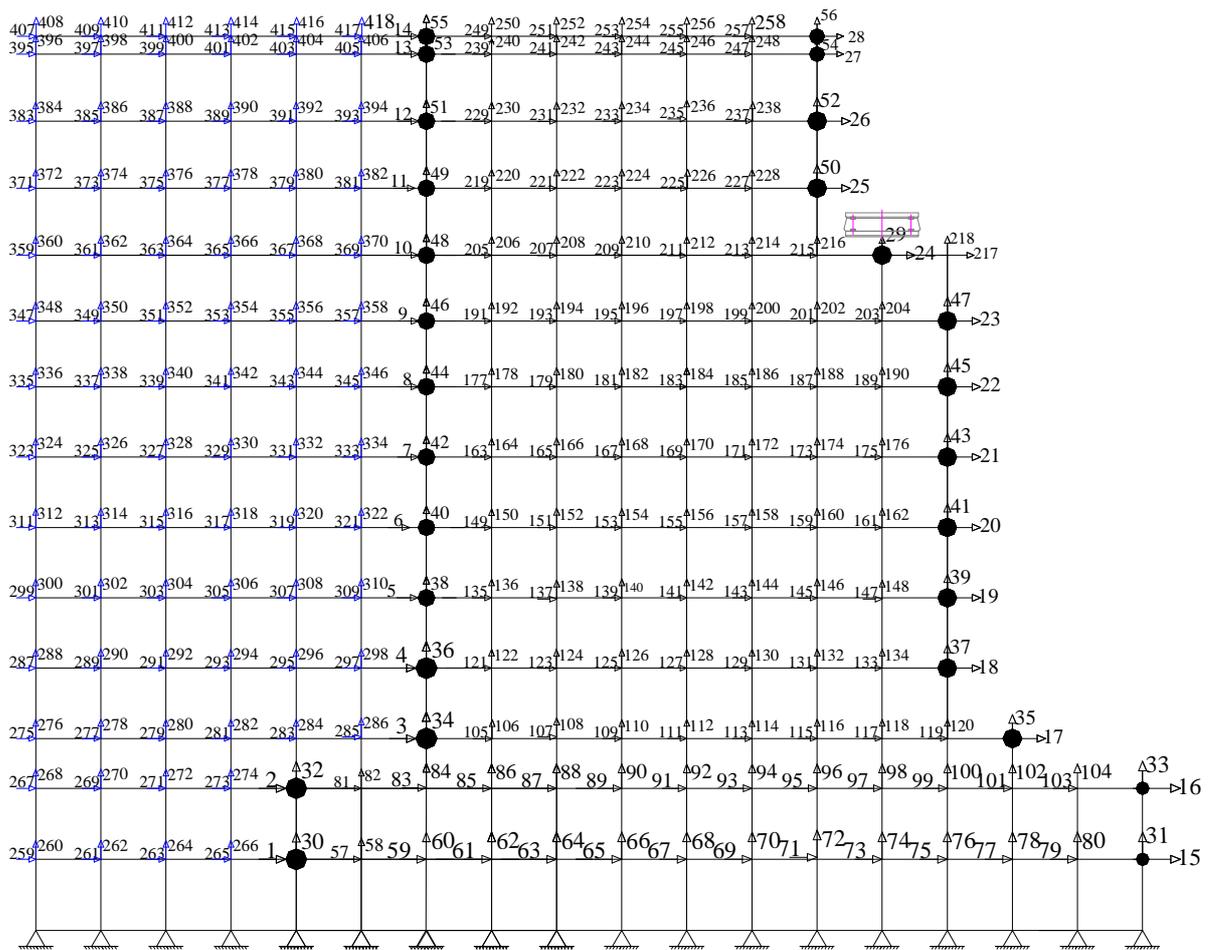


Figura 19 Coordenadas generales consideradas en el modelo del estribo izquierdo.

Para generar la matriz que contiene a los vectores de colocación del suelo se ha generado el programa *vc_suelo_ef*. Los datos de entrada de este programa son: el número de elementos finitos en sentido X; el número de elementos finitos en sentido Y; una matriz que contiene las coordenadas generalizadas del primer eje de vertical de la malla y una matriz que contiene las coordenadas generalizadas del último eje vertical de la malla; en esta matriz primero se coloca el grado de libertad horizontal y luego el vertical, en una fila.

Por cierto vale la pena recordar que el vector de colocación se forma con los grados de libertad del elemento empezando desde el vértice inferior izquierdo y se continúa en forma anti horaria, $VC = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 261 \ 262 \ 259 \ 260]$, para el primer elemento de la figura 19. La primera fila de la malla indicada en la figura 19 no es factible generar con *vc_suelo_ef*.

Las coordenadas principales del estribo izquierdo se indica en la figura 20. Nótese que se ha considerado como coordenada principal el desplazamiento vertical bajo el aislador, por esto se tiene ahora 29 grados de libertad. El programa que encuentra las matrices de rigidez y de masa del estribo izquierdo es: *rigidez_estribo_izquierdo_suelo_PSurDETALLADO*. En este programa se consideró que el módulo de poisson del suelo es 0.4 y que el módulo de elasticidad del suelo se halla con la siguiente ecuación.

$$E_s = \frac{E_0(1 - \nu - 2\nu^2)}{1 - \nu} \tag{4}$$

Donde E_0 es el módulo de deformación del suelo, se trabajó con $E_0 = 300 T / m^2$ y ν es el coeficiente de poisson del suelo.

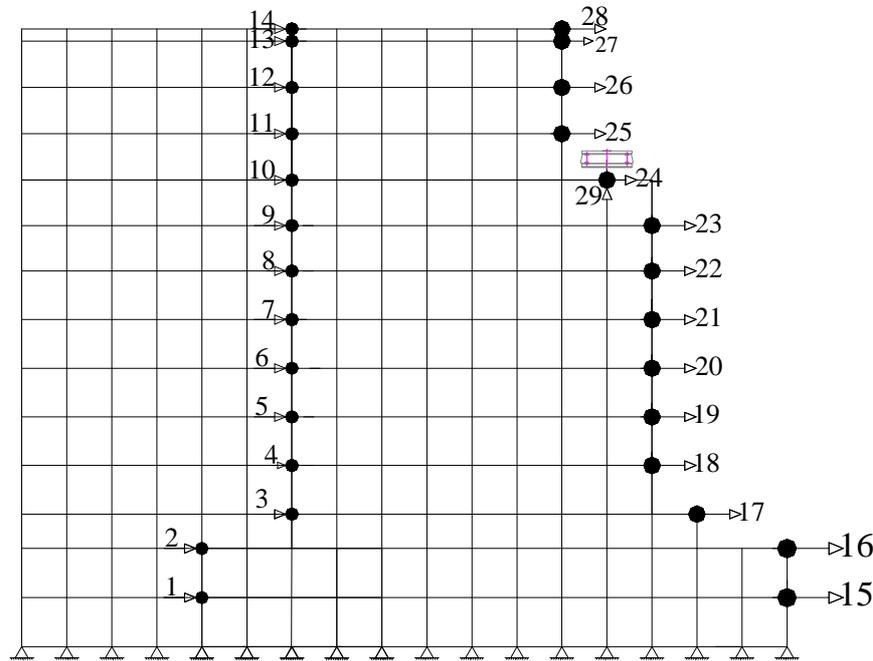


Figura 20 Coordenadas principales del estribo izquierdo en modelo 2.

El programa *rigidez_estribo_derecho_suelo_PS* obtiene la matriz de rigidez y de masa en coordenadas principales del estribo derecho. En la figura 21 se indican las coordenadas totales del estribo incluyendo el suelo a la derecha y en la figura 22 las coordenadas principales. En este caso no hay como aplicar directamente el programa *vc_suelo_ef*, para encontrar los vectores de colocación del suelo, pero se puede indicar el vector de colocación de los elementos que están en contacto con el estribo derecho y los demás grados de libertad se pueden generar con *vc_suelo_ef*.

Nótese que también se ha considerado como coordenada principal, el desplazamiento vertical en el apoyo.

8. COORDENADAS PRINCIPALES DE MODELO 2

En la figura 23 se indican los grados de libertad con los que se realizan el análisis sísmico considerando el modelo 2. Se tiene en total 176 grados de libertad, como coordenadas principales. El período de vibración de la estructura es de 1.34 s.

La masa vertical proveniente de la superestructura se concentró en los grados de libertad 29 (estribo izquierdo), 85 (apoyo 1), 137 (apoyo 2) y 160 (estribo derecho). Estos son grados de libertad verticales que fueron considerados como coordenadas principales. En cada uno de ellos la masa se obtuvo dividiendo el peso ($170 T * 3$) para la gravedad. La carga vertical en cada FPS es 170 T.

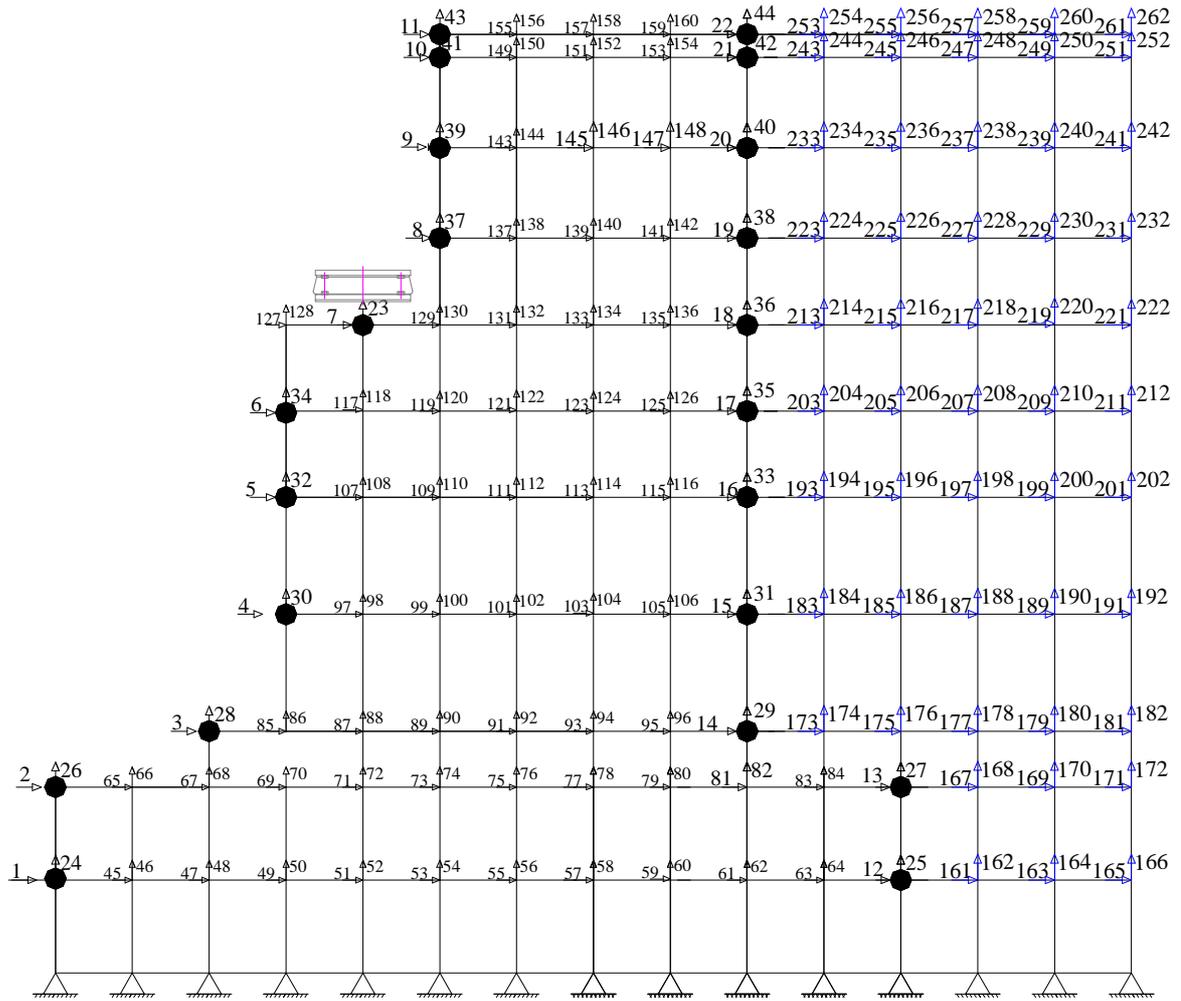


Figura 21 Coordenadas totales del estribo derecho con el suelo.

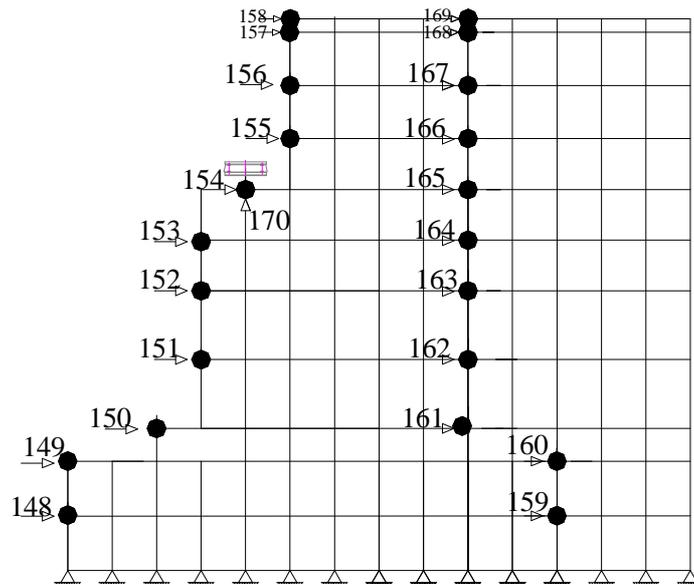


Figura 22 Coordenadas principales en estribo derecho con incorporación del suelo.

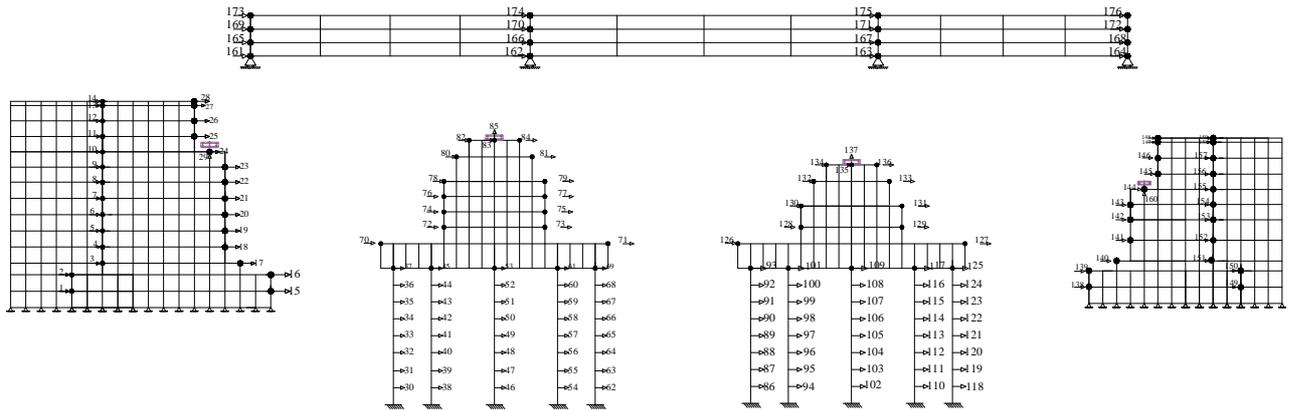


Figura 23 Grados de libertad de modelo con interacción suelo estructura en estribos.

9. RESULTADOS CON MODELO 2

Se hace notar al lector que el sistema de coordenadas del modelo 1, es diferente al sistema de coordenadas del modelo 2. Para el nuevo modelo la historia de desplazamientos se indica en la figura 24 para los grados de libertad indicados que son: a nivel de cimentación, bajo el FPS, sobre el FPS y en la parte superior de la viga de acero.

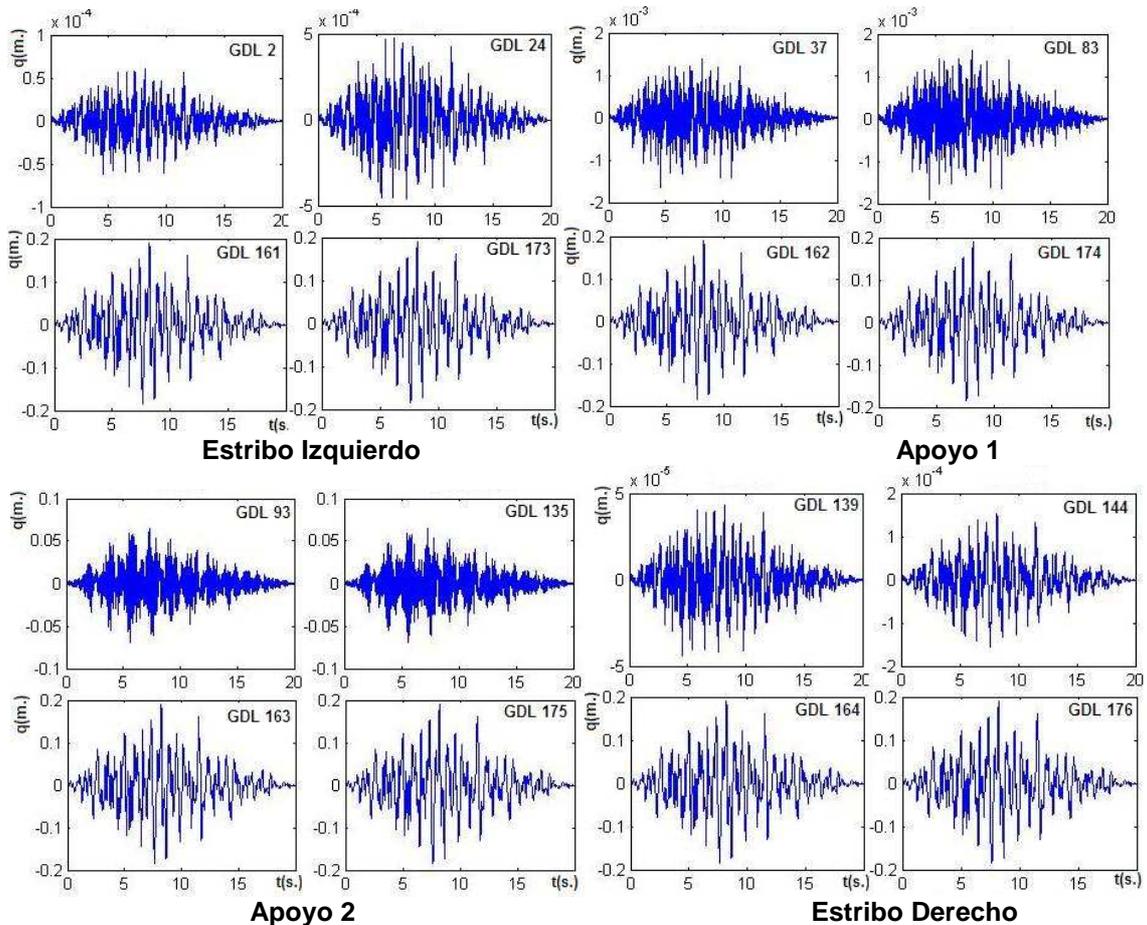


Figura 24 Respuestas de desplazamiento con Modelo 2.

Las respuestas de desplazamiento son mucho menores a las obtenidas con el modelo 1, se reducen a menos de la mitad como se podrá apreciar al comparar la figura 24 con la figura 14. No coinciden los grados de libertad pero los puntos que se están graficando son los mismos en los dos modelos.

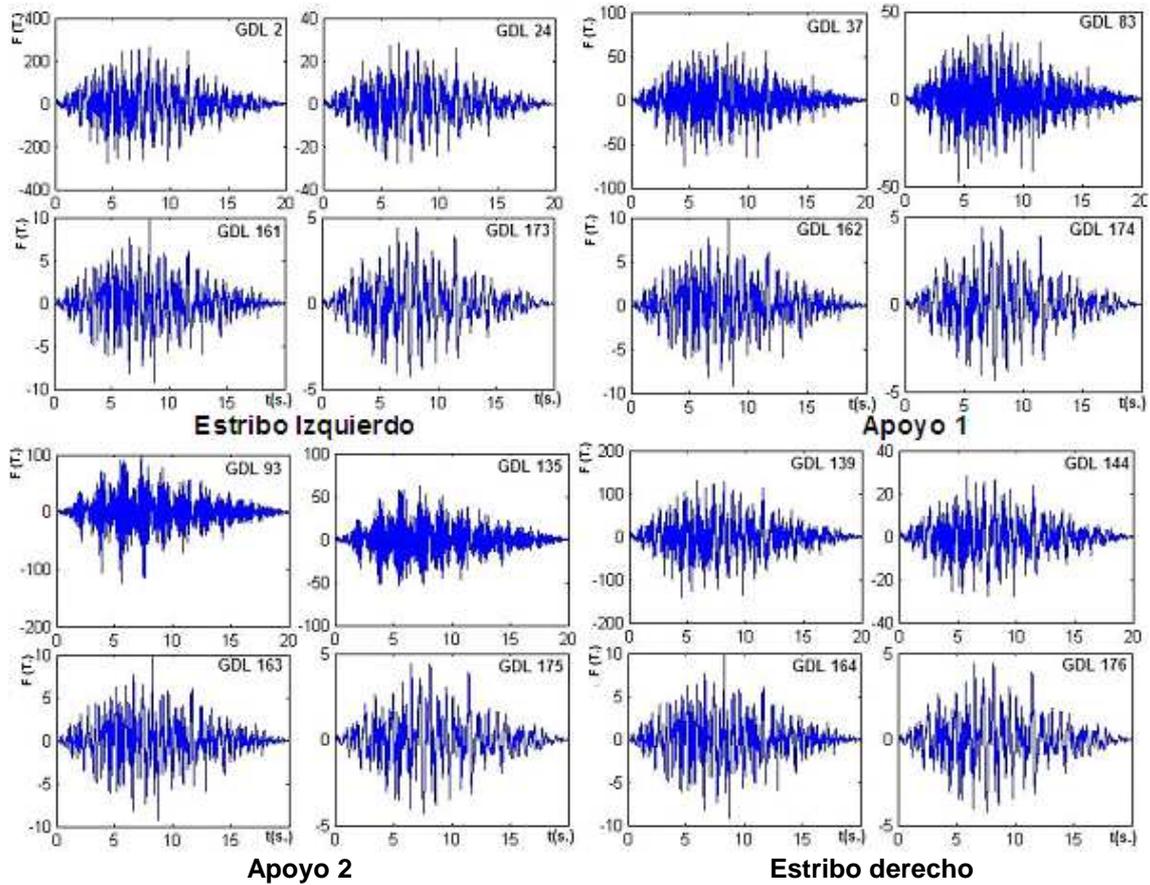


Figura 25 Respuestas en el tiempo de las fuerzas horizontales. Modelo 2.

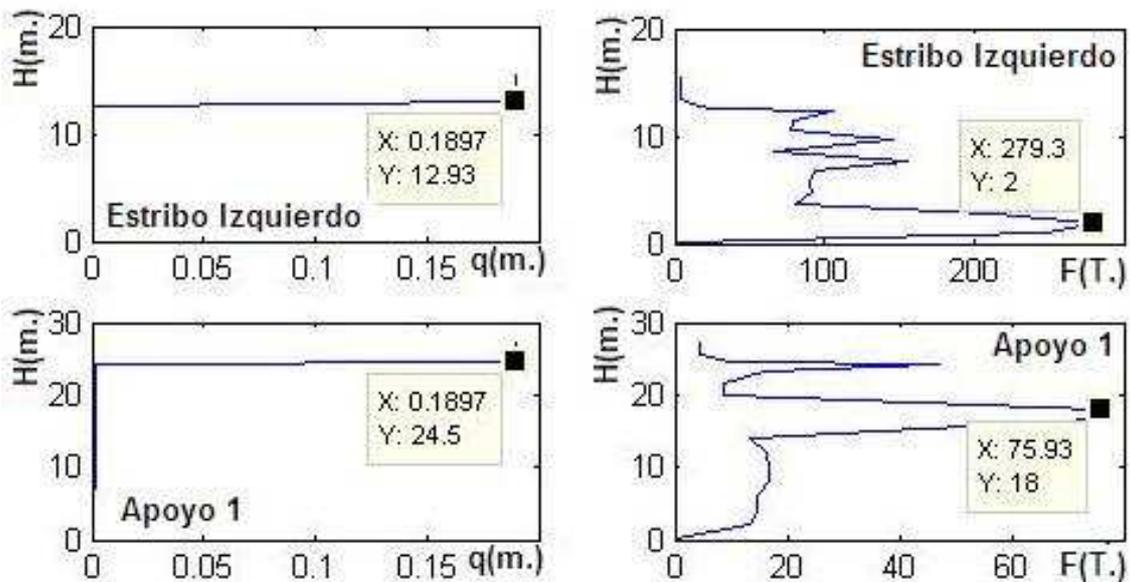


Figura 26 Respuestas máximas encontradas con el Modelo 2.

En la figura 25 se muestra la historia de las fuerzas halladas en el estribo izquierdo, apoyo 1, apoyo 2 y estribo derecho. Son diferentes a las encontradas en el modelo 1 y que constan en la figura 1.

Por último en la figura 26 se presentan los valores máximos en las cara exterior del estribo izquierdo y en la cara exterior del apoyo 1. En este gráfico es evidente la diferencia que existe entre estos resultados y los del modelo 1 que se encuentran en la figura 26. Nótese que en el modelo 2 los desplazamientos máximos están por el orden de los 20 cm., en cambio en el modelo 1 estos desplazamientos están por los 50 cm.

10. CONCLUSIONES

Se ha presentado dos modelos simplificados para el análisis sísmico de puentes con aisladores de base FPS. En el primer modelo no se consideró la presencia del suelo que se encuentra en la parte exterior de los estribos, en el segundo si se lo consideró mediante un modelo de elementos finitos rectangulares.

En el primer modelo el FPS es modelado como un resorte de rigidez k_b ; en el segundo modelo a más del resorte se considera el amortiguamiento del aislador c_b , el factor de amortiguamiento ξ_b del aislador fue obtenido experimentalmente. Para comparar los dos modelos se realizó el análisis sísmico del puente Sur, que se encuentra sobre el estuario del río Esmeraldas, es un puente de 160 m., de luz conformado por dos estribos y dos apoyos centrales.

Para cada uno de los modelos indicados se han desarrollado programas muy específicos que se incrementan a la librería del software educativo y práctico **CEINCI-LAB**, por este motivo es que se han descrito con cierto detalle ya que pueden utilizarse en otros puentes similares con pocos cambios.

La principal conclusión del estudio es que no incorporar el amortiguamiento del FPS en el modelo numérico de cálculo conduce a obtener desplazamientos laterales que son aproximadamente el doble de los que se hallan en el modelo 2 que considera el amortiguamiento de los FPS. Lo propio sucede a nivel de fuerzas.

Con el desarrollo de este artículo, en forma didáctica, se aspira haber aportado al desarrollo de la Ingeniería Sismo Resistente.

AGRADECIMIENTO

La investigación realizada forma parte del proyecto: "Aisladores de base de fricción de triple péndulo" financiada por la ESPE y que continua en desarrollo.

REFERENCIAS

1. Aguiar R., Almazán J. L., Dechent P., Suárez V., (2008), *Aisladores de base elastoméricos y FPS*, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, 292 p., Quito.
2. Aguiar R., (2004), *Análisis Matricial de Estructuras*, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, Cuarta Edición, 550 p.

3. Aguiar R., (2003), *Análisis Sísmico por Desempeño*, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, 340 p., Quito.
4. Aguiar R., García E., (2010), "Análisis sísmico en sentido longitudinal del Puente Carrizal con dos modelos, empleando CEINCI-LAB", *Revista CIENCIA. Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército*, **13 (1)**, 1-24. Quito.
5. Aguiar R., Añazco D., Ángulo R., (2010), "Análisis sísmico de apoyo central de modelo Puente Norte 1 utilizando un modelo simplificado para FPS", *III Congreso Nacional de Geotecnia. Colegio de Ingenieros Civiles de Pichincha*, 13 p., Quito.
6. Almazán J. L., (2001), *Torsión accidental y natural en estructuras aisladas con el sistema de péndulo friccional*, Tesis Doctoral. Pontificia Universidad Católica de Chile, 288 p., Santiago.
7. Beltrán F., (2008), "Informe del estudio de Mecánica de suelos sobre el estuario del río Esmeraldas", *Geosuelos Cia. Ltda.*, 111 p, Quito.
8. Constantinou M. C., Mokha A., Reinhorn A., (1990), "Teflon bearing in base isolation, Part II: Modeling", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **116**, 455-474.
9. Cook R, Malkus D., Plesha M., Witt R., (2001), *Concepts and applications of finite element analysis*, Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc. 719 p.
10. Fenz D., Constantinou M., (2006), "Behaviour of the double concave Friction Pendulum bearing", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **35**, 1403-1424.
11. Landazuri J., (2009), *Ensayos de aisladores FPS para puentes de Esmeraldas y Bahía de Caráquez*, Información enviada por Internet.
12. Zayas V., Low S., Bozzo L., Mahin S., (1989), *Feasibility and performance studies on improving the earthquake resistance of new and existing buildings using the friction pendulum system*, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, **Report N.- UCB/EERC-89/09**, 308 p., Berkeley, California.

PESTICIDAS NATURALES Y SINTETICOS

Vladimir Aguirre Yela ⁽¹⁾ , Vicente Delgado ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Centro de investigaciones Científicas
Escuela Politécnica del Ejército
waguirre@espe.edu.ec

RESUMEN

La industria de los pesticidas naturales en la actualidad a tomado una gran importancia, es así que en algunos países se ha tomado la decisión de reemplazar a los pesticidas sintéticos por los naturales, El uso indiscriminado de pesticidas sintéticos ha acarreado una serie de problemas en la salud humana, así como también han repercutido gravemente en la flora y la fauna animal, ya que estos pesticidas no son biodegradables y con el consumo continuo y prolongado causan serias enfermedades letales a los organismos vivientes. En nuestro país se esta empezando a desarrollar tecnologías para la fabricación de pesticidas naturales.

En este artículo se trabajo en la obtención de los pesticidas naturales en base a los principios activos del Eucalipto y del Ajo, que llevándolos a soluciones homogéneas en diversos medios de solución, se llegaron a establecer las condiciones mínimas y óptimas para el control y la mitigación de plagas en algunas plantas ornamentales de la ESPE así como también en cultivos de limón y tomate de árbol, es así que en forma separada o en forma conjunta utilizándose ya sea el eucalipto o el ajo, se logró mitigar al *Planococcus citri*, Conchuela y al Pulgón.

ABSTRACT

The natural pesticide industry at present taken on great importance, so that in some countries have taken the decision to replace synthetic pesticides by natural Indiscriminate use of synthetic pesticides has led to a series of problems in the human health and also have severely affected the flora and fauna animal, because these pesticides are not biodegradable and continuous long-term consumption cause serious diseases lethal to living organisms. Our country is beginning to develop technologies for the production of natural pesticides.

This article is working on obtaining natural pesticides based on the active principles of Eucalyptus and Garlic, leading to homogeneous solutions in various means of settlement, it came to establish minimum and optimum conditions for the control and mitigation pest in some ornamental plants in the ESPE as well as lemon and tomato crops tree, so that separately or together using either eucalyptus or garlic, it was possible to mitigate *Planococcus citri*, Conchuela and Aphid .

1. INTRODUCCION

El eucalipto tiene muchas propiedades benéficas para la salud humana y animal así como también para el control de plagas debido a su composición es decir sus principios activos. El principal componente del aceite esencial es el eter óxido terpénico cineol o eucaliptol, constituyendo el 70-80%, además contiene hidrocarburos monoterpénicos (10% de b-pineno, g-pineno, p-cimeno, camfeno, a-felandreno, b-felandreno, limoneno, mirceno), hidrocarburos sesquiterpénicos (1 % de aromadendreno, b-cariofileno, a-gurjuneno), alcoholes

monoterpénicos (borneol, linalol, terpineno, α -terpineol, 1,2% de transpinocarveol, geraniol), alcohol sesquiterpénico (6,9% de globulol; epiglobulol, trazas de eudesmol, ledol, viridiflorol), aldehidos alifáticos (butírico, valeriánico, caproico), citronelal, carvona, acetato de citronelilo, acetato de geraniol, 3,6% de acetato de α -terpinil (15-20).

El ajo y sus componentes, como son los sulfóxidos: S-metil-L-cisteína, S-propenil-S-cisteína, S-glutión, g-glutamyl-S-alilcisteína, g-glutamyl-S-alil-mercapto-L-cisteína, además se encuentran sales minerales (selenio), azúcares, lípidos, aminoácidos esenciales, saponósidos, terpenos, enzimas, flavonoides y otros compuestos fenólicos, contiene aceite volátil (1-3%) sulfurado (disulfuro de alilo), sulfóxido de S-alil (L)-(+)-cisteína o aliína (0,2%), vitaminas A y C, nicotilamida (7,8). La aliína se transforma en alicina (ver figura 1) y otros compuestos azufrados (tiosulfina), por la acción de la enzima aliinasa. Estos últimos son muy inestables y se transforman con extrema rapidez en otros compuestos organosulfurados: sulfuro de dialilo, disulfuro de dialilo (mayoritario en la esencia de ajo), trisulfuro de dialilo y ajoenos, todos ellos solubles en medio oleoso.

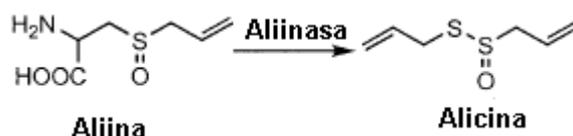


Figura 1 Transformación enzimática de la aliina en alicina.

Se considera que 1 mg de aliína equivale a 0,45mg de alicina. El ajo posee propiedades antioxidantes, tiene efectos antiterogénico, antihepatotóxico y anticancerígeno, propiedades inhibitorias de la agregación plaquetaria, la alicina es un potente agente antibacteriano frente a numerosos organismos patógenos gram-positivos y gram-negativos se ha verificado su actividad sobre bacterias de los géneros *Staphylococcus*, *Streptococcus*, *Vibrio* y *Bacillus* (12,15). Los aceites esenciales ejercen una potente acción antiséptica, balsámica y expectorante en la vía respiratoria, antifúngica, antituberculosis, antiviral (2,8,11,12,14), antihelmíntico, antiespasmódico, vasodilatador(4), diurético, hipcolesterolémico, estimula la secreción estomacal y biliar.

En este estudio se prepararon los pesticidas naturales en base a los principios activos del Eucalipto y el Ajo, los cuales fueron llevados a diferentes soluciones homogéneas y a concentraciones adecuadas para determinar la eliminación de plagas como son el *Planococcus citri*, Conchuela y el Pulgón. En diferente tipo de plantas ornamentales de la ESPE entre las cuales tenemos la *Schefflera*, *Millonaria*, *Palmera Washington*, *Mala Madre*, *Helecho* y en cultivos de *Limón* y *Tomate de árbol*.

2. METODOLOGÍA

2.1 Preparación de los principios activos de las plantas de Eucalipto y Ajo

En el procedimiento de preparación se recolectaron las hojas de la planta de eucalipto teniéndose cuidado de que estas fueran lo más frescas posibles y libres de parásitos para poder someterlas rápidamente al proceso de extracción (18,19). Para esto se recolectaron 4 sacos llenos de hojas de eucalipto, se procedió a fraccionarlas en pedazos más pequeños, seguidamente se las colocó en un recipiente de acero añadiéndose agua de manera que las hojas ocuparan la mitad del volumen de agua, seguidamente se tapó el recipiente el cual estaba provisto en su parte superior de una cabeza claisen unida a un refrigerante de cobre, se calentó a temperatura de ebullición del agua, y se recogió por destilación 200 ml de aceite puro de eucalipto.

Para la extracción de los principios activos del aceite esencial del ajo, se aisló el agente activo básico del ajo, la allina (6-8) que cuando es liberada interactúa con una enzima llamada allinasa y de esta forma se genera la alicina, la sustancia que contiene el olor característico y penetrante del ajo. Para la obtención de la alicina se trabajó a temperatura y presión ambiente, para lo cual en primer lugar se descascó el ajo, seguidamente se lo sometió a un proceso de trituración, luego de licuación, para luego extraer el principio activo con alcohol etílico al 96%, en extracciones sucesivas de hasta 5 veces. Para obtener el principio activo más puro se concentró el alcohol etílico obteniéndose una masa gelatinosa de un color amarillo pardo, entre otras sustancias tenemos: sulfóxidos S-metil-L-cisteína y S-propenil-S-cisteína, S-glutatión, g-glutamil-S-alil cisteína, g-glutamil-S-alil-mercapto-L-cisteína.

2.2 Elaboración de soluciones como vehículos para los principios activos

Una vez obtenidos los principios activos tanto del eucalipto como del ajo, se procedió a la elaboración de productos en soluciones homogéneas. Se probaron varias formulaciones entre las cuales las más efectivas fueron:

F1: La cual está constituida por el principio activo del aceite de eucalipto en diferentes proporciones, con el vehículo en el cual tenemos etanol y propilenglicol. F2: Constituida por el principio activo del aceite de eucalipto en diferentes proporciones, con el vehículo en el cual tenemos etanol, propilenglicol y lanolina hidrosoluble. F3: Formada por el principio activo del aceite de eucalipto en diferentes proporciones, con el vehículo constituido por etanol, propilenglicol, lanolina y emulsión de silicona al 60% con el objeto de que el tópico se fije más permanente en la planta sea en época seca o lluviosa. F4: Teniendo por principio activo del ajo en diferentes proporciones, con el vehículo formado por etanol, propilenglicol y lanolina hidrosoluble. F5: Constituida por el principio activo del aceite de ajo en diferentes proporciones, con el vehículo formado por etanol, propilenglicol, lanolina hidrosoluble y emulsión de silicona al 60% para una mayor fijación. F6: Formada por la combinación del principio activo del aceite de eucalipto y el principio activo del ajo ambos en diferentes proporciones, en vehículo formado por etanol, propilenglicol, lanolina hidrosoluble y emulsión de silicona al 60%. F7: La cual tiene en su composición el extracto concentrado del principio activo del ajo esto es una solución amarillenta muy espesa obtenida por la condensación de varias semanas de la fase final en la extracción con alcohol etílico al 96%, se utiliza como vehículo el etanol, propilenglicol, lanolina hidrosoluble y emulsión de silicona al 60%.

2.3 Aplicación sobre sistemas biológicos

En esta fase se determinó la aplicación de los productos en la concentración mínima necesaria en base a los principios activos del eucalipto o del ajo, en diferentes plantas ornamentales de la ESPE entre las cuales tenemos, la Schefflera, Millionaria, Palmera Washington, Mala Madre, Helecho y en cultivos de Limón y Tomate de árbol, para la mitigación de las plagas o sistemas biológicos encontradas las cuales fueron el Planococcus citri, Conchuela y el Pulgón.

2.4 Análisis de efectividad de los principios activos sobre los sistemas biológicos

Para observar la efectividad de la aplicación de los principios activos del eucalipto y el ajo llevados en diferentes soluciones homogéneas, sobre plagas se utilizó un estereoscopio (14,15) marca LEICA S4E provisto con placa de asentamiento para cajas petri así como también se utilizó el análisis in situ (29,30) sobre las plantas ornamentales de la ESPE y en los cultivos de limón y tomate de árbol infestadas con plagas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Preparación y aplicación de los principios activos del Eucalipto para la eliminación de plagas en la planta Schefflera

Para la aplicación sobre sistemas biológicos primeramente se tomó el aceite de eucalipto 22,34g con vehiculo de etanol y propilenglicol para llegar a obtener la cantidad necesaria y suficiente de 1000,00g, esta formulación se aplico a la especie de planta Schefflera la cual se encuentra atacada por la plaga Planococcus Citri, Cottonet o también llamada Cochinilla algodonosa(27-30). Esta plaga parte de la savia que toma la excreta como liquido azucarado brillante (melaza) sobre el cual se asienta el hongo la negrilla. Esta clase de ectoparásitos pertenecen a la clase de arácnidos son rastreros atacan a las plantas ricas en savia en la cual se hospedan hasta destruirla completamente y secarla en un ataque masivo y sin control, el planococcus citri puede destruir a toda la planta en un periodo comprendido de varias semanas, además de acuerdo a las observaciones en el laboratorio de esta plaga se determino que pueden desplazarse a grandes distancias buscando su medio de desarrollo, por lo que estos también se encuentran en la tierra aledaña a las plantas, la hembra deposita los huevos de forma ovalada y color amarillo en un saco ovigeno algodonoso de forma irregular. Los machos se originan de nifas al completar su segundo estadio, presenta de 2 a 4 generaciones anuales que se superponen por lo que se puede encontrar en cualquier época del año en cualquiera de sus estados. Sin embargo en el invierno disminuye su densidad y es más probable encontrar masas de huevos. Como se puede observar en la figura 2 al planococcus citri con los huevos y atacando a la planta.



Figura 2 Planococcus Citri atacando una hoja de Schefflera

A esta concentración, actuó sobre la colonia del Planococcus citri, pero no en toda la población. Para probar la efectividad del producto se recolectaron muestras de hojas y tallos atacados por el planococcus citri, una parte se coloco en cajas petri y otra parte se las dejo a la intemperie, ambas rociadas con la solución F1 que igualmente ataco a una parte de la población.

Se aumento la concentración de los principios activos del eucalipto a 41.99g por litro de vehiculo, se cojieron 20ml de esta solución y se aforo a 1l, como resultados tenemos que se elimino paulatinamente la colonia de Planococcus citri, es decir atacándose a su sistema operativo produciéndose una paralización del animal seguido de un proceso de secamiento.

Con la misma concentración anterior de los principios activos del eucalipto a 41.99g por litro de vehiculo, se cojieron esta vez 40ml de esta solución y se aforo a 1l, como resultados tenemos que se elimino rápidamente a la colonia de Planococcus citri, es decir atacándose a su sistema operativo produciéndose una paralización del animal seguido de un proceso de secamiento, como se puede observar en la figura 3, siendo esta una aplicación muy efectiva

para el control del ectoparásito tanto por aplicación por aspersión directa en la planta así como también en las pruebas efectuadas en el laboratorio en caja petri observadas al estereoscopio.



Figura 3 Proceso de secamiento en la eliminación del planococcus citri

La efectividad de esta solución se probó en varias plantas scheffleras ubicadas en diferentes dependencias de la ESPE, en las cuales tenemos el edificio central, en el 1, 2, y 3 piso, así como también en el edificio nuevo en el primer piso.

3.2 Aplicación del pesticida obtenido del Eucalipto en otras plantas

La concentración mínima requerida obtenida en base a los principios activos del Eucalipto de 41.99g por litro de vehiculo, en la cual se cojieron 20ml de esta solución y se aforo a 1l, fue aplicada a varias plantas, en las cuales se observó el nivel de mitigación del Planococcus citri y también de las conchuelas. En la tabla 1 se puede observar la efectividad del pesticida obtenido en base a los principios activos del Eucalipto para el control de la plaga.

Tabla 1 Pesticida en base de eucalipto a la concentración de 41.99g/l y 20ml a 1l, sobre planococcus citri

Tipo de planta	Principios activos del Eucalipto Grado de concentración	Tipo de plaga PLANOCOCCUS CITRI Resultado
Schefflera	41.99g/l y 20ml a 1l	Repelida
Millonaria	41.99g/l y 20ml a 1l	Repelida
Palmera Washington	41.99g/l y 20ml a 1l	Repelida
Mala Madre	41.99g/l y 20ml a 1l	Repelida
Helecho	41.99g/l y 20ml a 1l	Repelida
Limón	41.99g/l y 20ml a 1l	Repelida
Tomate de árbol	41.99g/l y 20ml a 1l	Repelida

Como se puede observar en la tabla 1 la acción de los principios activos del eucalipto sobre las diferentes plantas es más bien repelente, es por eso que se cojieron 40ml de la solución anterior como se puede ver en la tabla 2.

Tabla 2 Pesticida en base de eucalipto a la concentración de 41.99g/l y 40ml a 1l, sobre *planococcus citri*

Tipo de planta	Principios activos del Eucalipto Grado de concentración	Tipo de plaga PLANOCOCCUS CITRI Resultado
Schefflera	41.99g/l y 40ml a 1l	Eliminación rápida
Millonaria	41.99g/l y 40ml a 1l	Eliminación rápida
Palmera Washington	41.99g/l y 40ml a 1l	Eliminación rápida
Mala Madre	41.99g/l y 40ml a 1l	Eliminación rápida
Helecho	41.99g/l y 40ml a 1l	Eliminación rápida
Limón	41.99g/l y 40ml a 1l	Eliminación rápida
Tomate de árbol	41.99g/l y 40ml a 1l	Eliminación rápida

La concentración mínima efectiva con acción mitigante sobre la colonia de *planococcus citri* se la puede apreciar en la tabla 2.

3.3 Preparación y aplicación de los principios activos del Ajo en la eliminación de plagas en diferentes plantas

En la aplicación del pesticida obtenido a partir de los principios activos del ajo, se probaron varias concentraciones, de las cuales la más efectivas son las que se prepararon a partir de 370g de la solución etanólica del ajo con sus principios activos, además utilizando como vehículo propilenglicol, lanolina anhidra y solución de silicona al 60% en un total de 493g, de este preparado se separaron 50 ml y se aforo a un litro, como se puede apreciar en la tabla 3.

Tabla 3 Pesticida en base de ajo a la concentración de 370g/493g y 50ml a 1l, sobre *planococcus citri*

Tipo de planta	Principios activos del Ajo Grado de concentración	Tipo de plaga PLANOCOCCUS CITRI Resultado
Schefflera	370g/493g y 50ml a 1l	Repelida
Millonaria	370g/493g y 50ml a 1l	Repelida
Palmera Washington	370g/493g y 50ml a 1l	Repelida
Mala Madre	370g/493g y 50ml a 1l	Repelida
Helecho	370g/493g y 50ml a 1l	Repelida
Limón	370g/493g y 50ml a 1l	Repelida
Tomate de árbol	370g/493g y 50ml a 1l	Repelida

En la tabla 3 se observa que a la concentración indicada el *planococcus citri* no es eliminado sino solamente repelido por lo que es muy probable de que en la planta se produzca una nueva reinfestación, entonces es necesario aumentar la concentración efectiva como se indica en la tabla 4, la cual elimina rápidamente al *planococcus citri*.

Tabla 4 Pesticida en base de ajo a la concentración de 370g/493g y 100ml a 1l, sobre *planococcus citri*

Tipo de planta	Principios activos del Ajo Grado de concentración	Tipo de plaga PLANOCOCCUS CITRI Resultado
Schefflera	370g/493g y 100ml a 1l	Eliminación rápida
Millonaria	370g/493g y 100ml a 1l	Eliminación rápida
Palmera Washington	370g/493g y 100ml a 1l	Eliminación rápida
Mala Madre	370g/493g y 100ml a 1l	Eliminación rápida
Helecho	370g/493g y 100ml a 1l	Eliminación rápida
Limón	370g/493g y 100ml a 1l	Eliminación rápida
Tomate de árbol	370g/493g y 100ml a 1l	Eliminación rápida

3.4 Análisis de la efectividad de los principios activos concentrados del ajo

Seguidamente se preparó una solución más concentrada del pesticida del ajo para ello se utilizó, 557g de la solución etanólica del ajo, propilenglicol, etanol, lanolina, emulsión de silicona y se puso 1.5g del concentrado puro de la solución etanólica del ajo en 17g de agua, para completar los 681.5g del total de la solución, la cual fue aplicada con buenos resultados, como se indica en la tabla 5.

Tabla 5 Pesticida en base de ajo a la concentración de 557g y 1.5g/681.5g sin aforo, sobre *planococcus citri*

Tipo de planta	Principios activos del Ajo, solución etanólica y concentrada, Grado de concentración	Tipo de plaga PLANOCOCCUS CITRI Resultado
Schefflera	557g y 1.5g/681.5g sin aforo	Eliminación rápida
Millonaria	557g y 1.5g/681.5g sin aforo	Eliminación rápida
Palmera Washington	557g y 1.5g/681.5g sin aforo	Eliminación rápida
Mala Madre	557g y 1.5g/681.5g sin aforo	Eliminación rápida
Helecho	557g y 1.5g/681.5g sin aforo	Eliminación rápida
Limón	557g y 1.5g/681.5g sin aforo	Eliminación rápida
Tomate de árbol	557g y 1.5g/681.5g sin aforo	Eliminación rápida

3.5 Aplicación del pesticida formado por los principios activos del ajo y del eucalipto

Se preparó el pesticida formado por el eucalipto y el ajo, para lo cual en la fórmula de 370g solución etanólica de ajo, se añadieron 8g de principios activos del eucalipto, además utilizando como vehículo propilenglicol, lanolina anhidra y solución de silicona al 60% en un total de 501g, para combatir al *planococcus citri*, como se puede observar en la tabla 6.

Tabla 6 Pesticida en base de ajo y del eucalipto a la concentración de 370g y 8g/501g sin aforo, sobre *planococcus citri*

Tipo de planta	Principios activos del Ajo, y del Eucalipto Grado de concentración	Tipo de plaga PLANOCOCCUS CITRI Resultado
Schefflera	370g y 8g/501g sin aforo	Eliminación rápida
Millonaria	370g y 8g/501g sin aforo	Eliminación rápida
Palmera Washington	370g y 8g/501g sin aforo	Eliminación rápida
Mala Madre	370g y 8g/501g sin aforo	Eliminación rápida
Helecho	370g y 8g/501g sin aforo	Eliminación rápida
Limón	370g y 8g/501g sin aforo	Eliminación rápida
Tomate de árbol	370g y 8g/501g sin aforo	Eliminación rápida

Como se puede ver en la tabla 6, la efectividad del producto de la combinación de los principios activos tanto del eucalipto como del ajo es de una eliminación rápida del *planococcus citri*.

3.6 Mitigación del pulgón en base a los principios activos del ajo

En algunas plantas cheflera, tomate de árbol, y millonaria además del *planococcus citri* se encontró el pulgón, como se puede apreciar en las figuras 4 y 5, a los cuales se los conoce también como áfidos (21), se caracterizan por su rápida multiplicación y cuando atacan una planta puede verse cubriendo en su totalidad las hojas y brotes, son insectos chupadores, provistos de un largo pico mediante el cual absorben la savia de las plantas y se presentan en variedad halada y sin alas. Los pulgones son los principales transmisores del virus, pican en una planta infectada y al picar en otra sana le inyectan el virus.



Figura 4 Pulgón verde



Figura 5 Pulgón amarillo

Las variedades del pulgón son resistentes a las concentraciones indicadas anteriormente en las diversas pruebas efectuadas, ya que solamente los repelía pero no los eliminaba, por lo que se probó solamente con el pesticida del ajo, como se puede observar en la tabla 7, formado por los principios activos en solución etanólica, el cual elimino rápidamente el pulgón, y además quedaba una capa aceitosa adherida a las superficies en contacto de las plantas la cual permitía que por algunos días no se acerque el pulgón.

Tabla 7 Pesticida a base de ajo en solución etanólica

Tipo de planta	Principios activos del Ajo en solución etanólica Grado de concentración	Tipo de plaga PULGON Resultado
Schefflera	500ml puro	Eliminación rápida
Millonaria	500ml puro	Eliminación rápida
Tomate de árbol	500ml puro	Eliminación rápida

4. CONCLUSIONES

Las plantas de eucalipto y ajo han demostrado ser unos excelentes pesticidas naturales, esto es en base a los resultados obtenidos, ya que estos pesticidas no atacan solamente a un tipo de plaga sino que tienen un amplio margen de acción plaguicida, debido a sus principios activos, los cuales actúan en el organismo del animal paralizando sus funciones vitales, pero no atacando a la planta en ninguna de sus funciones, dentro de las concentraciones mínimas requeridas.

Del eucalipto el principio activo con acción plaguicida a demostrado ser el 1,8-Cineol, para el ajo el principio activo con mayor acción plaguicida es la Allina o sulfóxido de S-alil-cisteína (aminoácido azufrado), que se transforma en Alicina por acción de la enzima Allinasa, estos principios activos actuando en forma aislada o conjunta son muy buenos plaguicidas.

Con los pesticidas obtenidos del ajo y del eucalipto, se probaron en varias plantas entre las cuales tenemos: Schefflera, Millonaria, Palmera Washington, Mala Madre, Helecho. Limón, Tomate de árbol, las mejor concentración de acción plaguicida para el eucalipto es de 41.99g/l y 40ml a 1l, para el ajo la mejor concentración de acción plaguicida es de 370g/493g y 100ml a 1l, para la solución etanólica del ajo y su extracto concentrado es de 557g y 1.5g/681.5g sin aforo, cuando se utilizan para acción plaguicida los principios activos del ajo y del eucalipto juntos su mejor concentración encontrada es de 370g y 8g/501g sin aforo y solamente los principios activos puros del ajo en solución etanólica.

En las plantas Schefflera, Millonaria, Palmera Washington, Mala Madre, Helecho. Limón, Tomate de árbol, se encontraron principalmente las plagas Planococcus Citri y el Pulgón, para el caso del Planococcus citri se observó que este era vulnerable tanto para el eucalipto como para el ajo en las concentraciones de efectividad indicadas, pero en el caso del pulgón este presentaba gran resistencia tanto para el eucalipto como para el ajo, e incluso si se trabajaba con los dos pesticidas juntos, por lo que de acuerdo a los ensayos realizados el único que actuó en el sistema nervioso del animal paralizando sus funciones biológicas fue el extracto de los principios activos del ajo en solución etanólica, ya que este a más de atacar al animal formaba una capa aceitosa adherente y protectora del ataque del pulgón en la planta.

Una vez realizada la curación de plagas en las plantas descritas, con cualquiera de los pesticidas mencionados ya sea del eucalipto o del ajo o de los dos juntos, es necesario repetir por lo menos cada quince días la aplicación para evitar una reinfestación ya que los huevos de estos ectoparásitos se pueden encontrar en los sectores aledaños a la planta sobre todo en la tierra.

5. RECOMENDACIONES

Seguir investigando el uso benéfico de los pesticidas naturales obtenidos de diversas plantas en la mitigación de plagas, para no depender del uso de los pesticidas sintéticos que son tóxicos para el hombre y el medio ambiente.

AGRADECIMIENTO

A los directivos de la Escuela Politécnica del Ejército, en especial al Sr. Director del Vicerrectorado de Investigaciones Crnl. Rodolfo Salazar y al Sr. Director del CEINCI Dr. Roberto Aguiar Falconí, por haber financiado el proyecto de Investigación: "Pesticidas Naturales y Sintéticos".

También se agradece la colaboración del Sr. Hector Huaca, jardinero de la ESPE por sus aportes de plantas infestadas en el desarrollo del proyecto.

REFERENCIAS

1. LOVATIS S. CASTELLANI F. (1994). Alimentos y Plantas Medicinales. 1ª ed. Ed. NORMA S.A. pp.118-119, Colombia.
2. CÁCERES A. (1995). Plantas de uso medicinal en Guatemala. Ed. Universitaria. Universidad de San Carlos de Guatemala. pp. 63-68, Guatemala.
3. DUKE JA, VASQUEZ MR. (1994). Amazonian ethnobotanical dictionary. pp.215-220, USA.
4. WILLIAM AR, THOMSON DM. (1981). Guía práctica ilustrada de las plantas medicinales. Ed. Blume 220 p., Barcelona.
5. LEWIS WH. & ELVIN-LEWIS MP. (1977). Medical botany; plants effecting ma's health. 515 p., USA
6. ARIAS AE. (1991). El libro de las Plantas Medicinales, 20va ed.Ed. Oveja Negra. 338 p, Colombia.
7. PERIS JB, STUBING G, VANACLOCHA B. (1995). Fitoterapia Aplicada. Colegio oficial de farmacéuticos de Valencia. 628 p., Valencia – España.
8. HAMON NW. (1987). Herbal Medicine: Gardie and the genus Allium, Revue Pharmaceutique Candiense; pp.493.
9. BLOCK E (1985) Química del ajo y la cebolla, Scientific American. **252 (3)** 114-119.
10. SUÁREZ S, RÁENZ J, MARROQUÍN M. (1996). Actividad enzimática antioxidante en el extracto acuoso de *Allium sativum*: acción en homogenizado de tejido pulmonar. Libro

Resumen III Congreso Nacional de Ciencia Farmacéuticas y Bioquímicas. Academia Peruana de Farmacia. 62p., Lima – Perú.

11. ROTZCH W, y col.(1992): Postprandiale Lipamie unter medikation von Allium sativum, Arzneimittel Froschung-Drug Research. **42(II)10**, 1223-1227, Deutschland.
12. BENIGNI R, y col (1971). Piante Medicinali, Chimica farmacología e terapia. Vol. I. Inverni de Ila Beffa; pp.21-36, Italia.
13. MÍRELMAN D. y col. (1987) Inhibition of growth of Entamoeba histolytica by allicin, the active principle of garlic extract, The Journal of infections Diseases. **156**, 1243-1244.
14. RAMÍREZ R, MOSTACERO J, ARAUJO E, MEJÍA F, PELÁEZ F, MEDINA D. (1998). Vegetales empleados en medicina tradicional norperuana. Perú; pp. 1-23, 28-38, 40-53, Peru.
15. ALONSO JR. (1997) Tratado de fitomedicina bases clínicas y farmacológicas. Ed. ISIS ediciones SRL. pp.202-217., Buenos Aires – Argentina.
16. BERDONCES JL. (1996). Gran enciclopedia de las plantas medicinales. Ed. Tikal. 901p., Barcelona – España.
17. CÁCERES A. (1995). Plantas de uso medicinal en Guatemala. Ed. Universitaria. Universidad de San Carlos de Guatemala. pp.170-172, Guatemala.
18. PHARMACOPÉE TRADITIONNELLE PPROVENCE – CORSE. (1997) Ethnopharmacologia. Bulletin de la Société Fr_se d'Ethnopharmacologie et de la Société Européenne d'Ethnopharmacologie. **20**,18-34, Francia.
19. DELLACASSA E, MENENDEZ P, MOYNA P, SAGHI M,IL IDRISSE A (1990): Pouvoir antimicrobien de l'huile essentiella de Eucalyptus ciltrlodora Al Biruniya, Rev. Mar. Pharm.**6(2)**, 22-31, Francia.
20. HMAMOUCHE M, TANTAOUI-ELERAOKI A, ES-SAFI N, AGOUMI A1(1990) Mise en évidence des propriétés antibactériennes et antifongiquesdes huiles essentielles d'Eucalyptus. Plantes médicinales et phytothérapie. **24(4)**,362-366, Francia.
21. PELLECUER J (1995) Aromaterapia y toxicidad de los aceites esenciales. Natura Medicatrix. **37(38)**, 36-40, España.
22. TAKASAKI M, y col.(1995) Anti-tumor-promoting activities of euglobals from Eucalyptus plants. Biol-Pharm Bull. **18(3)**, 435-438.
23. WEBB NJA, PITT WR (1993) Eucalyptus oil poisoning in childhood: 41 cases in south-east Queensland. J Paediatr-Child-Health. **29(5)**, 368-371.
24. DELLACASSA E, y col.(1989) Antimicrobial actibity of Eucalyptus essential.oils, Fitoterapia. **LX(6)**, 544- 546.
25. MARTINDALE THE EXTRA PHARMACOPEIA. (1978). 27 th. ed. Ed. WADE; 1017p.
26. TYLER VE. (1994). Herbs of choice. The therapeutic use of phytomedicinals. The Haworth Press, pp.96-97.
27. HAJJIF, Y col (1993) Antimicrobial activity of twenty-one Eucalyptus essential oils, Fitoterapia. **LXIV(1)**, 71p.

28. CETAAR. (1998). Libro Plantas Medicinales del Nordeste. Ed. CETAAR-INCUPPO; pp.51-70.
29. SCULL R, MIRANDA M, INFANTE RE (1998). Plantas medicinales de uso tradicional en Pinar del Río. Estudio etnobotánico. I Rev Cubana Farm.**32(1)** , 52-57, Cuba.
30. CETAAR.(1998) Libro Plantas Medicinales del Nordeste - Ed. CETAAR -INCUPPO; pp. 61-'70.

EVALUACIÓN DE DOS MÉTODOS PARA LA REDUCCIÓN DE NITRÓGENO, FÓSFORO Y DQO DE AGUAS RESIDUALES, MEDIANTE UN CULTIVO AXÉNICO DE CIANOBACTERIAS Y UN CONSORCIO MICROBIANO, INMOVILIZADOS Y EN SUSPENSIÓN

Mauricio Moreno,⁽¹⁾ Blanca Naranjo,⁽¹⁾ & Alma Koch.^{(1), (2)}

⁽¹⁾ Departamento de Ciencias de la Vida
Carrera de Ingeniería en Biotecnología
Escuela Politécnica del Ejército

⁽²⁾ Centro de Investigaciones Científicas
Escuela Politécnica del Ejército

RESUMEN

Se evaluó la eficiencia de reducción de nitrógeno amoniacal, fósforo total y demanda química de oxígeno (DQO), en agua residual sintética y semi-sintética utilizando una cepa axénica de *Nostoc sp.* y un consorcio microbiano, inmovilizados en perlas de alginato de calcio y en suspensión. Tras un período de 21 días de tratamiento, se observó, para el agua residual semi-sintética que el cultivo inmovilizado de *Nostoc sp.* presentó la mayor eficiencia de reducción de nitrógeno y fósforo, mientras que para el agua residual sintética, no existió una reducción de nitrógeno con respecto a la concentración inicial del mismo con ninguno de los tratamientos, y la mayor reducción de fósforo fue observada en el cultivo inmovilizado del consorcio microbiano. Transcurridos 18 días, se observó que para la DQO, en ambos ensayos, la mayor eficiencia de reducción la presentaron los cultivos en suspensión, tanto del consorcio como de la cepa axénica, incluyendo también el tratamiento sin inóculo, para el caso del agua residual semi-sintética (que solo contó con la microbiota propia del agua residual). Finalmente se realizaron pruebas de toxicidad en *Daphnia pulex* con el agua tratada correspondiente al cultivo de cianobacterias axénico inmovilizado, sin evidenciarse mortalidad en los organismos de prueba.

ABSTRACT

It was evaluated the efficiency of ammonia, total phosphorus and chemical oxygen demand (COD) reduction in synthetic and semi-synthetic wastewater using an axenic strain of *Nostoc sp.* and a microbial consortium immobilized in calcium alginate beads and in suspension. After a period of 21 days of treatment, it was observed for the semi-synthetic wastewater that the immobilized culture of *Nostoc sp.* had the highest reduction efficiency of ammonia and phosphorus. For synthetic wastewater, there wasn't ammonia reduction on the concentration with none of the initial treatments, and further reduction of phosphorus was observed in the cultivation immobilized microbial consortium. Within 18 days, it was observed that for COD, in both trials, semi-synthetic and synthetic wastewater, that the greater efficiency of reduction was introduced by the suspension cultures, both the consortium as axenic strain, also including the control treatment, in the case of semi-synthetic wastewater (which only had the original microbial charge of wastewater). Finally toxicity tests were carried out on *Daphnia pulex*, using the treated water of the cultivation of axenic cyanobacteria immobilized without mortality evident in organisms test.

1. INTRODUCCIÓN

Las cianobacterias, o algas verde-azules, son un grupo diverso y amplio de organismos procariotes Gram-negativos que pertenecen al Dominio *Bacteria*, presentan una gran importancia debido a sus capacidades fotosintéticas y de fijación de nitrógeno. Poseen una amplia distribución ecológica, ocupando un rango de hábitats que incluyen desde zonas bastas oceánicas hasta desiertos o aguas termales (Herrero *et al.*, 2001; Hall *et al.*, 1982). Son organismos fotoautotróficos que asimilan CO₂ a través del Ciclo de Calvin en presencia de luz, aunque algunas especies son capaces de realizar crecimiento quimioheterotrófico en la completa oscuridad o a bajas intensidades de luz (Herrero, *et al.*, 2001; Fay, 1992).

El agua residual representa un medio apropiado para el crecimiento de cianobacterias (Abalde *et al.*, 1995), pues posee bicarbonatos, nitratos y fosfatos, los cuales son tres aniones para los que estas han desarrollado mecanismos altamente eficientes para tomar y retener (Ernst *et al.*, 2006) razón por la que han sido consideradas como una alternativa para el tratamiento de aguas residuales (Chacón *et al.*, 2004; Abalde *et al.*, 1995).

El cultivo de cianobacterias en aguas residuales ofrece dos ventajas simultáneas, la primera, el tratamiento de dichas aguas y, por otra parte, la posibilidad de producir biomasa que posteriormente podría ser explotada en forma de complementos proteínicos, aditivos alimenticios o farmacéuticos, energía como biogas y combustibles, fertilizantes entre otros valiosos químicos (Mallick, 2002).

Se ha comprobado que su uso en el tratamiento de aguas residuales es potencialmente provechoso en la reducción de contaminantes como la DQO, DBO₅, sólidos suspendidos totales, metales pesados, entre otros (El-Bestawy, 2008). Así también el diseño de sistemas de cianobacterias inmovilizadas, representa una opción de tratamiento económicamente eficiente (Mallick & Rai, 1993).

En últimos estudios, se ha evidenciado su efectividad también en la remoción de metales traza del agua, ampliando así los campos de aplicación de las cianobacterias en materia de biorremediación de aguas (Baptista & Vasconcelos, 2006).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Microorganismos

La cepa axénica número 15 (posiblemente de *Nostoc sp.*) y el consorcio microbiano número 11 (con cianobacterias), fueron proporcionados por el Laboratorio de Microbiología Ambiental del Centro de Investigaciones Científicas de la ESPE.

Los cultivos fueron mantenidos en medio de cultivo líquido BG11 (Rippka, 1988), a un fotoperíodo luz/oscuridad de 16:8, irradiancia de aproximadamente 1000 Lux, a 20±2 °C de temperatura y aireación continua (Koch *et al.*, 2008).

2.2 Preparación de agua residual semi-sintética y sintética

Se preparó agua residual semi-sintética a partir de agua residual real colectada en la descarga de efluentes de la ESPE, sin esterilización previa, suplementándole fósforo inorgánico (K₂PO₃) y carbono orgánico en forma de peptona y extracto de carne (CEE, 1982) con el fin de llegar a condiciones de un agua residual urbana media (Metcalf & Eddy Inc. 1995).

El agua residual sintética fue preparada de acuerdo a lo establecido por la Comunidad de Estados Europeos en sus referentes para los métodos de control de tensoactivos (CEE, 1982) asemejando las concentraciones de nitrógeno amoniacal, fósforo total y DQO a los parámetros de un agua residual urbana media (Metcalf & Eddy Inc. 1995).

2.3 Condiciones del experimento

Se dispusieron 275 mL de agua residual por unidad experimental. Las condiciones de cultivo fueron de 4161.25 ± 136.37 Lux, a una temperatura de 22 ± 2 °C, con fotoperíodo de 16 horas de luz, 8 de oscuridad (Koch *et al.*, 2008), sin aireación por 21 días. Tanto para las células en suspensión e inmovilizadas, se partió de un inóculo inicial de cianobacterias de 4×10^5 cel/mL (Chacón *et al.*, 2004).

La inmovilización celular se llevó a cabo homogenizando los inóculos previamente cuantificados, en una solución de alginato de sodio al 1,25% (p/v) mediante goteo sobre una solución de cloruro de calcio al 1% (p/v) con una bureta (Morales, 2006).

2.4 Diseño experimental

Se llevó a cabo un DCA de 5 tratamientos con 3 repeticiones para cada uno y pruebas de comparación de medias de Duncan en el programa SPSS 15.0.

2.5 Cuantificación de nitrógeno amoniacal, fósforo total y DQO

Se utilizaron los métodos colorimétricos de la sal de fenol, el ácido vanadomolibdofosfórico y de reflujo cerrado para la cuantificación de nitrógeno amoniacal, fósforo total y DQO respectivamente (APHA, AWWA & WEF, 1998; APHA, AWWA & WPCF, 1992).

2.6 Ensayos de toxicidad en *Daphnia pulex*

Se expuso a neonatos de *Daphnia pulex* con menos de 24 horas de nacidos a cinco concentraciones de agua residual semi-sintética tratada, las cuales fueron de 100%, 50%, 25%, 12.5% y 6.25%, además de un blanco constituido solamente de agua dura como control negativo (Castillo, 2004).

3. RESULTADOS

3.1 Reducción de nitrógeno amoniacal, fósforo total y DQO en agua residual semi-sintética

La concentración de nitrógeno, descendió de 24.93 ± 0.9 mg/L a valores entre 4.54 ± 0.9 mg/L y 0.16 ± 0.1 mg/L. En cuanto al fósforo, la concentración inicial de 11.87 ± 0.5 mg/L se redujo en todos los tratamientos a valores entre 0.93 ± 0.1 mg/L y 0.40 ± 0.1 mg/L. Finalmente la demanda química de oxígeno (DQO) se redujo de una concentración inicial de 411.93 ± 3.8 mg/L a valores entre 116.34 ± 19.1 mg/L y 60.96 ± 4.7 mg/L (Tabla 1).

Tabla 1. Concentración final y porcentaje de reducción de nitrógeno, fósforo y DQO en agua residual semi-sintética utilizando un cultivo axénico de cianobacterias y un consorcio microbiano, inmovilizados y en suspensión.

Tratamiento	Concentración final mg/L			Reducción %		
	Nitrógeno	Fósforo	DQO	Nitrógeno	Fósforo	DQO
Agua semi-sintética	3.45 ± 0.5	0.84 ± 0.1	73.50 ± 17.8	86.18 ± 2.3	92.91 ± 1.4	82.16 ± 4.3
Axénico	4.54 ± 0.9	0.93 ± 0.1	62.01 ± 9.4	81.78 ± 3.6	92.17 ± 0.2	84.95 ± 2.2
Consortio	2.86 ± 0.4	0.92 ± 0.1	60.96 ± 4.7	88.52 ± 1.9	92.22 ± 0.9	85.20 ± 1.1
Ax. Inmovilizado	0.16 ± 0.1	0.40 ± 0.1	116.34 ± 19.5	99.37 ± 0.6	96.65 ± 1.2	71.76 ± 4.6
Cons. Inmovilizado	3.51 ± 0.0	0.84 ± 0.2	113.21 ± 20.1	85.94 ± 0.3	92.96 ± 2.0	72.52 ± 4.8

Para los tres parámetros, se halló alta diferencia significativa entre los tratamientos. Realizadas las pruebas de comparación de medias de Duncan, se determinó que para la reducción de nitrógeno (99.37%) y fósforo (96.65%) el mejor tratamiento lo constituyó el cultivo axénico inmovilizado, mientras que para la reducción de DQO los mejores tratamientos fueron los cultivos suspendidos tanto de la cepa axénica (84,95%) como del consorcio microbiano (85.20%), incluyendo el tratamiento del agua semi-sintética (82.16%).

3.2 Reducción de nitrógeno amoniacal, fósforo total y DQO en agua residual sintética

La concentración de nitrógeno descendió de 28.72 ± 2.0 mg/L a 22.66 ± 4.5 mg/L solamente para el caso del tratamiento agua sintética, mientras que en el resto, el valor final fluctuó entre 41.5 ± 5.90 mg/L y 53.23 ± 5.1 mg/L. En cuanto al fósforo, este disminuyó de una concentración inicial de 15.01 ± 0.5 mg/L a valores entre 1.00 ± 0.6 mg/L y 13.11 ± 0.1 mg/L. Por otra parte, la demanda química de oxígeno (DQO), de una concentración inicial de 324.76 ± 3.3 mg/L pasó a valores de concentración final entre 66.67 ± 10.6 mg/L y $29.01 \pm 4,8$ mg/L, excluyendo el tratamiento agua sintética (Tabla 2).

Tabla 2. Concentración final y porcentaje de reducción de nitrógeno, fósforo y DQO en agua residual sintética utilizando un cultivo axénico de cianobacterias y un consorcio microbiano, inmovilizados y en suspensión.

Tratamiento	Concentración final mg/L			Reducción %		
	Nitrógeno	Fósforo	DQO	Nitrógeno	Fósforo	DQO
Agua sintética	22.66 ± 4.5	13.11 ± 0.1	324.67 ± 35.0	21.12 ± 15.7	12.61 ± 1.0	0.03 ± 10.8
Axénico	53.23 ± 5.1	6.39 ± 0.1	66.67 ± 10.6	-	57.41 ± 1.2	79.47 ± 3.2
Consortio	45.14 ± 7.2	5.63 ± 0.7	$29.01 \pm 4,8$	-	62.45 ± 5.1	91.07 ± 1.5
Ax. Inmovilizado	43.96 ± 1.8	3.56 ± 0.5	53.49 ± 7.1	-	76.29 ± 3.4	83.53 ± 2.1
Cons. Inmovilizado	41.54 ± 5.9	1.00 ± 0.6	37.48 ± 4.8	-	93.36 ± 4.2	88.46 ± 1.5

Se encontró diferencia significativa alta entre los tratamientos. Realizadas las pruebas de medias de Duncan, se estableció que el cultivo del consorcio inmovilizado fue el que mejor eficiencia de reducción de fósforo total presentó (93.36%), mientras que su par suspendido, mostró la mejor eficiencia de reducción de DQO (91.07%). Para el caso del nitrógeno amoniacal, ninguno de los tratamientos, a excepción del de agua sintética, demostró reducción alguna con respecto a la concentración inicial del contaminante.

3.3 Pruebas de toxicidad en *Daphnia pulex*

Transcurridas las 48 horas de exposición de los organismos de prueba al agua tratada correspondiente al tratamiento del cultivo axénico inmovilizado, no se halló mortalidad de los individuos a ninguna de las concentraciones utilizadas

4. DISCUSIÓN

Cuando la taza nitrógeno-fósforo está en un rango entre 2 y 5, como en el presente trabajo, es de esperarse una predominancia en el crecimiento de las cianobacterias con respecto a otros grupos taxonómicos existentes en el medio (Levich, 1996). Por tanto, sería atribuible que la reducción de estos dos elementos estaría relacionada estrechamente con el crecimiento predominante de cianobacterias. Sin embargo, se debe considerar el rol que cumplieron los microorganismos nativos propios del agua residual en los procesos de degradación, como se evidenció en el ensayo con el agua residual sintética que no presentó

reducción de nitrógeno, comparado con el llevado a cabo en el agua residual semi-sintética, fenómeno citado por Moreno *et al.* (2010, en prensa). La mayor reducción de este elemento fue debida a la presencia de otros microorganismos, ya que el amonio representa la fuente de nitrógeno más accesible tanto para autotróficos como para heterotróficos (Singleton, 2004; Muro-Pastor *et al.*, 2005; Flores *et al.*, 2005).

Los cultivos inmovilizados, presentaron mayor reducción de nitrógeno y fósforo en relación a la observada por sus pares en suspensión, de manera similar a lo citado por Mallick (2002) en un estudio realizado con la microalga verde *Chlorella vulgaris* y la cianobacteria *Anabaena doliolum*.

En el tratamiento con agua sintética, sin inóculo microbacteriano alguno, la reducción de nitrógeno se debió a la volatilización del nitrógeno por procesos físico-químicos de equilibrio, al presentarse en el medio iones hidroxilo por un pH ligeramente básico (Loomis & Connor, 2002)

Las cianobacterias, a pesar de ser microorganismos fotoautotróficos, son capaces de utilizar carbono orgánico en sus procesos metabólicos (Yu, Jia & Dai, 2009; Mishra, Kumar & Jha, 1985) lo que explica la reducción considerable de DQO presentada por el cultivo axénico suspendido en el agua residual sintética.

La ausencia de toxicidad del agua tratada sobre *Daphnia pulex* puede explicarse a, que como se ha descrito, (Leflaive & Ten-Hage, 2007) las toxinas producidas por las cianobacterias de la familia Nostocales son liberadas al medio cuando se produce lisis celular, como resultado de crecimiento masivo, lo cual no se presentó en la presente investigación, o a que esta cepa de cianobacterias no presentan toxicidad.

5. CONCLUSIONES

El cultivo axénico de cianobacterias inmovilizado presentó la mayor eficiencia de remoción de nitrógeno amoniacal y fósforo total, mientras que los tratamientos en suspensión, así como el agua residual semi-sintética con la microbiota original del agua residual, presentaron una capacidad similar de reducción de DQO.

El ensayo en agua residual sintética demuestra que el consorcio microbiano y la cepa de *Nostoc sp.* son capaces de reducir las concentraciones de fósforo y DQO independientemente de la microbiota propia del agua residual.

El agua residual tratada mediante un cultivo axénico de *Nostoc sp.* inmovilizado no presentó toxicidad en *Daphnia pulex*.

REFERENCIAS

1. Abalde, J. Cid, A. Fidalgo, P. Torres, E. y Herrero, C. 1995. Microalgas: Cultivos y Aplicaciones. Monografía No 26. (pp 181). Coruña.: Laboratorio de Microbiología. Facultad de Ciencias, Universidad de Coruña.
2. APHA, AWWA & WEF. 1998. Standard methods for the examination of water and wastewater. (pp. 4:103). Washington D. C.: Author.
3. APHA, AWWA y WPCF. 1992. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. (pp. 4:192-5:15). Madrid: Días de Santos.
4. Baptista, M. & Vasconcelos, M. 2006. Cyanobacteria metal interactions: requirements, toxicity, and ecological applications. Critical reviews in microbiology. Vol. 32. 127-137.
5. Castillo, G. 2004. Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de aguas: estandarización, intercalibración, resultados y aplicaciones. (pp. 90). México D. F.: Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo.

6. Chacón, C. Andrade, C. Cárdenas, C. Araujo, I. y Morales, E. 2004. Uso de *Chlorella sp.* y *Scenedesmus sp.* en la remoción de nitrógeno, fósforo y DQO de aguas residuales urbanas de Maracaibo, Venezuela. Boletín de Investigaciones Biológicas de La Universidad del Zulia. Vol. 38. No. 2. 94 – 108.
7. Comunidad de Estados Europeos. 1982. Referente a la aproximación de las legislaciones de los estados miembros relativas a los métodos de control de la biodegradabilidad de los tensoactivos no iónicos y por la que se modifica la directiva 73/404/CEE. Bruselas: Autor. (Miliarium, Ingeniería Civil y Medio Ambiente; DOCE 109/L, DE 22-04-82).
8. El-Bestawy, E. 2008. Treatment of mixed domestic-industrial wastewater using cyanobacteria. J. Ind. Microbiol Biotechnol 35:1503-1516
9. Ernst, A. Deicher, M. Herman, P. & Wollenzien, Ute I. 2005. Nitrate and phosphate affect cultivability of cyanobacteria from environments with low nutrient levels. Applied and Environmental Microbiology. Vol. 71. No. 6. 3379 – 3383.
10. Fay, P. 1992. Oxygen relations of nitrogen fixation in cyanobacteria. Microbiological Reviews. Vol. 56. No. 2. 340 – 373.
11. Flores, E. Frías, J. Rubio, L. & Herrero. 2005. Photosynthetic nitrate assimilation in cyanobacteria. Photosynthesis Research. Vol. 83:117-133
12. Hall, G., Flick, M., Gherna, R., & Jensen, R. 1982. Biochemical diversity for biosynthesis of aromatic amino acids among the cyanobacteria. Journal of bacteriology. Vol. 149. No. 1. 65-78
13. Herrero, A., Muro – Pastor, A., & Flores, E. 2001. Minireview. Nitrogen control in cyanobacteria. Journal of bacteriology. Vol. 183. No 2. 411-425
14. Koch, A. García, M. Villacís, N. Vieira, N. y Rosero, G. 2008. Condiciones óptimas de crecimiento de cianobacterias en cultivo mixto procedentes de la filosfera de bosques nativos de *Polylepis pauta*. Ciencia. Vol 11,1:99-111
15. Leflaive, J. & Ten-Hage, L. 2007. Algal and cyanobacterial secondary metabolites in freshwaters: a comparison of allelopathic compounds and toxins. Freshwater biology. Vol 52. 199-214
16. Levich, A. P. 1996. The role of nitrogen-phosphorus ratio in selecting for dominance of phytoplankton by cyanobacteria or green algae and its application to reservoir management. Journal of aquatic ecosystem health. Vol. 5. 55-61
17. Loomis, R. & Connor, D. 2002. Ecología de cultivos. (pp. 226). Madrid: Mundi Prensa.
18. Mallick, N. 2002. Biotechnological potential of immobilized algae for wastewater N, P and metal removal: a review. Biometals. Vol.15:377-390
19. Mallick, N. & Rai, LC. 1993. Influence of culture density, pH, organic acids and divalent cations on the removal of nutrients and metals by immobilized *Anabaena doliolum* and *Chlorella vulgaris*. World J. Microbiol Biotechnol. 9: 196-201
20. Metcalf & Eddy Inc. 1995. Ingeniería de aguas residuales, tratamiento vertido y reutilización. (Vol. 1) Madrid: McGraw-Hill.
21. Moreno, M. Naranjo, B. & Koch, A. 2010. Reducción de nitrógeno, fósforo y DQO de aguas residuales mediante un cultivo axénico de cianobacterias y un consorcio microbiano nativos en suspensión. En prensa.

22. Mishra, D. Kumar, H. & Jha, M. 1985. Effects of some carbon sources on growth and nitrogen fixation in the cyanobacterium *Nostoc linckia*. *Biología Plantarum*. 1: 1-5
23. Muro-Pastor, M. Reyes, J. & Florencio, F. 2005. Ammonium assimilation in cyanobacteria. *Photosynthesis Research*. Vol. 83:135-150
24. Morales, E. 2006. Inmovilización de microalgas. Universidad del Zulia. [CD-ROM]. Curso de microalgas y cianobacterias: memorias. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
25. Rippka, R. 1988. Isolation and purification of cyanobacteria. *Methods Enzymol*. Vol. 167. 6 – 9
26. Singleton, P. 2004. *Bacteria in biology, biotechnology and medicine*. (pp. 304). United States: Wiley.
27. Yu, H. Jia, S. & Dai, Y. 2009. Growth characteristics of the cyanobacterium *Nostoc flageliforme* in photoautotrophic, mixotrophic and heterotrophic cultivation. *J Appl Phycol*. 21: 127-133

ANÁLISIS SÍSMICO EN SENTIDO LONGITUDINAL DEL PUENTE CARRIZAL CON DOS MODELOS. EMPLEANDO CEINCI-LAB

Roberto Aguiar Falconí, Edwin García

Centro de Investigaciones Científicas
Escuela Politécnica del Ejército
raguiar@espe.edu.ec

RESUMEN

Se describe con cierto detalle el puente Carrizal, ubicado en la Provincia de Manabí, que está compuesto por dos estribos abiertos con contrafuerte, uno de ellos se encuentra sobre pilotes. Adicionalmente existen dos apoyos interiores, cada uno de ellos conformado por 9 pilotes circulares y cuatro niveles de vigas de arriostramiento dos de ellas son de acero y dos de hormigón armado.

Posteriormente se describen varios programas que se han implementado para el software **CEINCI-LAB**. Estos programas son para el cálculo de las matrices de rigidez y de masas del estribo izquierdo, de uno de los apoyos, del estribo derecho y de una de las vigas de acero de 75 m., de longitud. En el anexo 1 se indica el programa final con el cual se realizó el análisis sísmico longitudinal empleando los programas de **CEINCI-LAB**.

Se comparó la respuesta en el tiempo, empleando dos modelos de análisis, en el primero se consideró el empuje activo del suelo sobre los estribos y en el segundo modelo no se consideró este empuje activo. Para el primer modelo el vector de condiciones iniciales no es nulo y está compuesto por los desplazamientos laterales que genera el suelo en el estribo. Para el segundo modelo el vector de condiciones iniciales es nulo. Se utilizó un sismo artificial de 20 s., de duración compatible con el espectro del Código Ecuatoriano de la Construcción para suelo S3.

ABSTRACT

It describes in some detail the bridge Carrizal, located in the province of Manabí, which consists of two open abutments with buttresses, one of them is on piles. Additionally two interior supports exist, each one of them conformed by 9 circular piles and four levels of bracing beams two of them is of steel and two of armed concrete.

Subsequently described several programs that have been implemented to **CEINCI-LAB** software. These programs are for the calculation of stiffness matrices and mass of the left abutment of one of the supports, the right abutment and one of the beams steel of 75 m. long. Annex 1 show the final program which was conducted using longitudinal seismic analysis programs **CEINCI-LAB**.

We compared the response in time, using two analysis models, the first was considered active soil thrust the abutment and the second model did not consider this passive resistance. For the first model, the vector of initial conditions is not null and is composed of the lateral displacements generated by the soil in the abutment. For the second model, the vector of initial conditions is null. We used artificial earthquake 20 seconds, time compatible with the spectrum of the Ecuadorian Code of Construction for soil S3.

11. DESCRIPCIÓN DE PUENTE

En la Provincia de Manabí se encuentra el Puente Carrizal, construido por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército y forma parte de la carretera Quiroga-Pichincha. En la parte superior de la figura 1 se aprecian las poblaciones de Quiroga y Pichincha y la vía se encuentra dentro del círculo, al lado del campamento se halla ubicado el puente.

El puente tiene una longitud de 249.20 m., está compuesto por dos estribos y dos pilas intermedias, como se observa en la parte inferior de la figura 1. En los espacios libres de cada tramo se tienen cuatro vigas metálicas de 75 m., de longitud, unidas por diafragmas y tensores inferiores. Las pilas intermedias están sobre nueve pilotes prebarrenados de 2.0 m., de diámetro que cubren tramos de 12 m., del tablero del puente; en cada tramo está previsto la construcción de juntas de dilatación de 5 cm., con lo que se tiene los 249.20 m. Morales (2009).

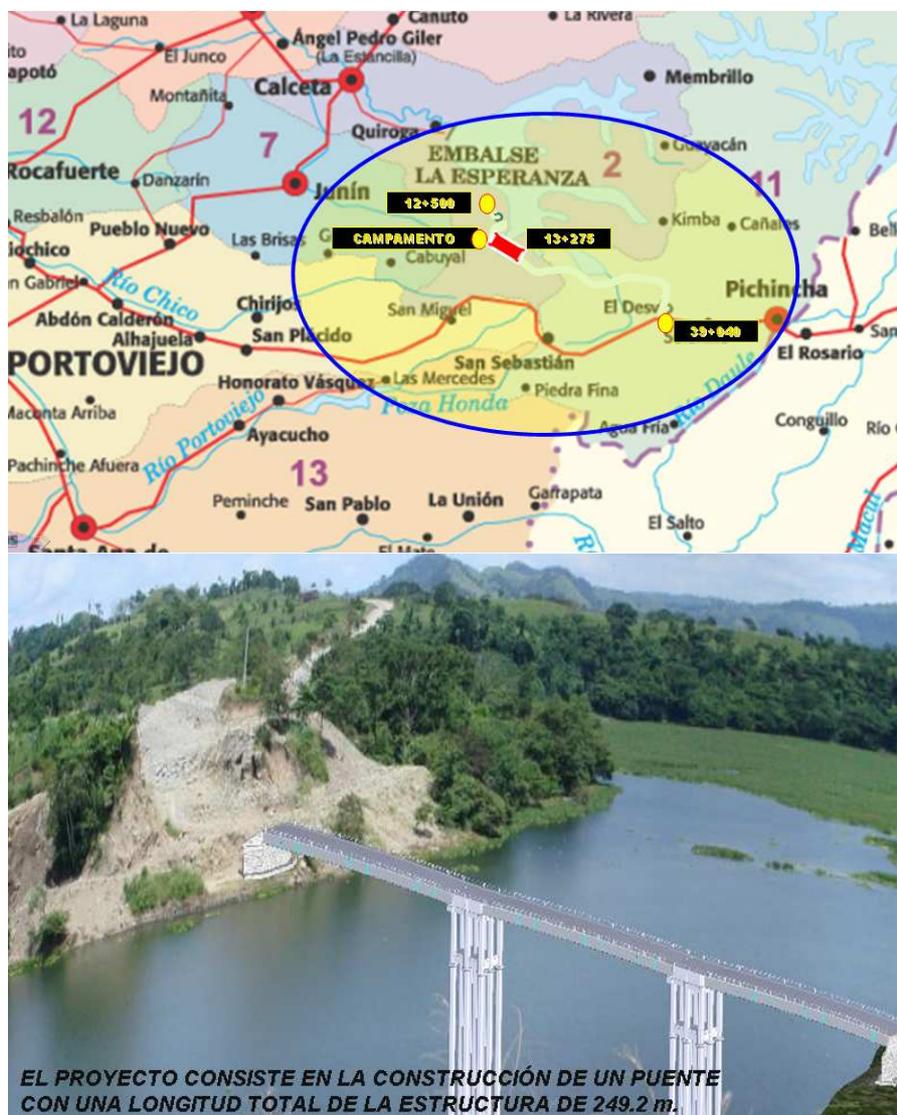


Figura 1 Panorámica del puente sobre el río Carrizal. (Cortesía de E. Morales 2009).

En la figura 2 se aprecian los dos estribos del puente; el que se encuentra en la parte superior no tiene pilotes de cimentación; se aprecia que en la montaña se ha realizado un corte

para el eje de la vía (fotografía superior izquierda), a este estribo denominaron *Estribo Quiroga*, ya que se encuentra más cerca de la población de Quiroga. La parte central del estribo es recta y tiene dos alas en sus lados. En la fotografía superior derecha se presenta otra vista del estribo, en la cual aparecen las trabas sísmicas, en la parte superior, que impiden que las vigas de acero de 75 m., de longitud se salgan ante movimientos en sentido transversal al eje del puente, ya que las vigas de acero se encuentran simplemente apoyadas sobre las vigas del estribo, tema que se detallará más adelante.

En la parte inferior de la figura 2, aparece el otro estribo que si tiene pilotes en su cimentación. En la fotografía inferior izquierda se observan los cabezales de los pilotes que fueron fundidos conjuntamente con la viga cabezal, en la fotografía aparecen 14 pilotes no se aprecian 2 más; en total son 16 pilotes. En la fotografía inferior izquierda se aprecia las vigas metálicas que se han colocado sobre el estribo; a este lo llaman *Estribo Pichincha*. En esta última figura se observa la construcción de los dos apoyos interiores del puente.



Figura 2 Estribos del puente sobre el río Carrizal. (Cortesía de Morales E., 2010).

La geometría de los dos estribos es prácticamente la misma por eso se describe en forma general los elementos estructurales que contiene cada uno de ellos. Como se manifestó, el estribo tiene una parte central recta y dos alas, como se observa a la izquierda de la figura 3, que corresponde a una vista posterior del estribo; se observa que hay dos contrafuertes en cada una de las alas y cuatro contrafuertes en la parte central; en total se tienen ocho contrafuertes de 0.40 m., de espesor con una base inferior de 2.85 m., y una base superior de 0.85 m.; la altura de estos contrafuertes es de 5.93 m. Para el análisis sísmico que se presenta en este artículo, los contrafuertes fueron modelados como rectangulares. Vinueza (1992)

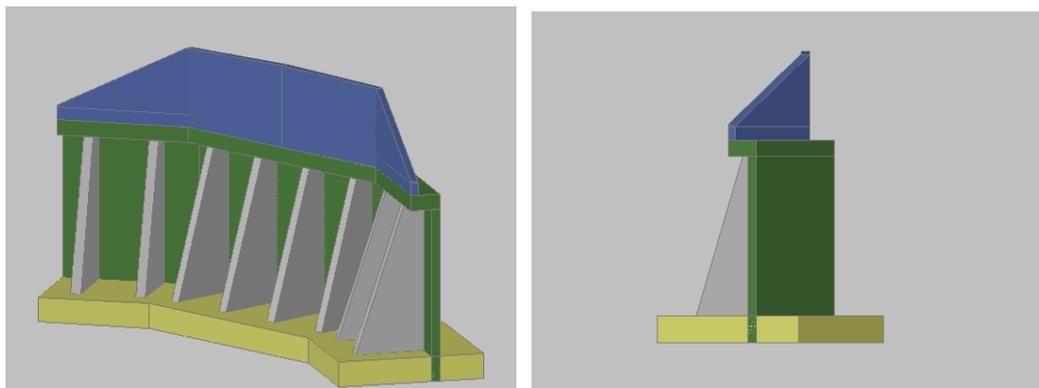


Figura 3 Vista posterior y lateral de los estribos.

En la parte frontal de los contrafuertes se encuentra una pantalla de 0.35 m., de espesor y de la misma altura de los contrafuertes; sobre estos dos elementos estructurales (contrafuerte y pantalla) hay una viga de 1.20 m., de base y 0.60 m., de alto. Es sobre esta viga que se van a asentar los apoyos de neopreno y las cuatro vigas de acero tipo *I*, que como se indicó, tienen una longitud de 75.0 m., cada una.

Para terminar con la descripción rápida del estribo se debe indicar que en la parte superior hay otra pantalla de 0.30 m., de espesor y 3.30 m. de alto en la parte recta ya que en las alas, la altura es variable como se ve en la figura 3. Por último pero en primer lugar se debe indicar que la cimentación de la pantalla tiene 1.20 m., de alto en el estribo con pilotes y 1.00 m., de alto en el estribo sin pilotes; en la figura 3 se aprecia la forma de la cimentación que dicho sea de paso se encuentra sobre un replantillo de 0.10 m.

Una vez que se ha descrito la geometría de los estribos, se pasa ahora a indicar la forma de los apoyos centrales del puente. Se había indicado que cada apoyo tiene nueve pilotes, los mismos que se presentan en la parte superior de la figura 4, a la derecha de esta figura se observa las camisas de acero de los pilotes que tienen un espesor de 1.5 cm., fueron colocadas las camisas con el objeto de protegerlas del medio ambiente pero estas camisas proporcionan rigidez y resistencia adicional a la del pilote de hormigón armado, de 2 m., de diámetro.

En la fotografía inferior de la figura 4 se observa los pilotes y las vigas de arriostramiento superior e inferior de acero, que se hallan en las cotas 56 m., y 62 m., las cotas mencionadas son referidas a la parte inferior de la viga; estas vigas tienen un peralte de 1.60 m., y 0.90 m., respectivamente, son vigas tipo *I* (la cota de desplante de los pilotes es 16.82 m. Morales 2009).

De los nueve pilotes que existen en cada apoyo, seis son exteriores y tres interiores. Ahora bien, los pilotes exteriores son de 2 m., de diámetro en una altura de 54 m., y luego se reducen a 1 m., de diámetro como se observa en la figura 5. Los tres pilotes interiores son de 2 m., de diámetro en toda su longitud que está alrededor de los 58.50 m.

Dos aspectos son importantes de destacar con relación a la figura 5. El primero que a más de las vigas de arriostramiento de acero, existe en los apoyos dos vigas más de hormigón armado, la una se halla en la cota 70.279; es una viga de 0.80 m., de base por 1.25 m., de altura; la otra viga tiene una base de 0.50 m., y una altura de 0.80 m. El segundo aspecto es que la reducción del diámetro de los pilotes exteriores de 2.0 m., a 1 m., es para tener espacio para apoyar las vigas longitudinales de acero de 75 m., por este motivo en la figura 5 se observa que la viga de hormigón armado de 1.25 m., de peralte tiene unos voladizos para que el apoyo tenga una longitud de 1.0 m.

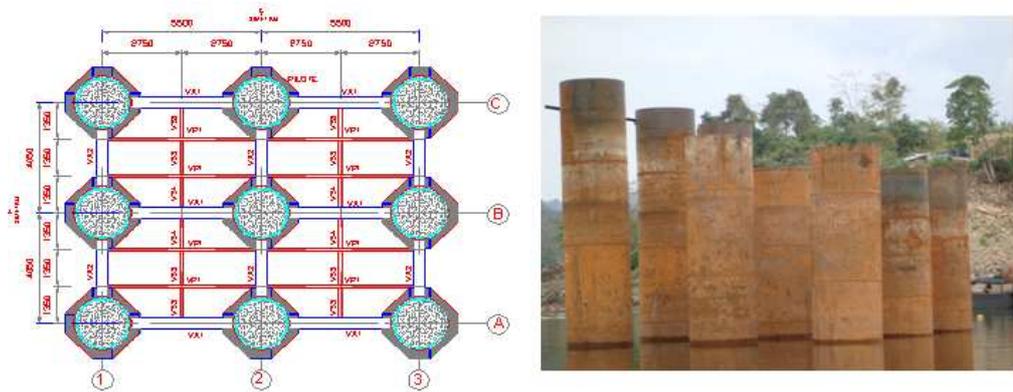


Figura 4 Pilotes y vigas de acero de apoyos centrales.

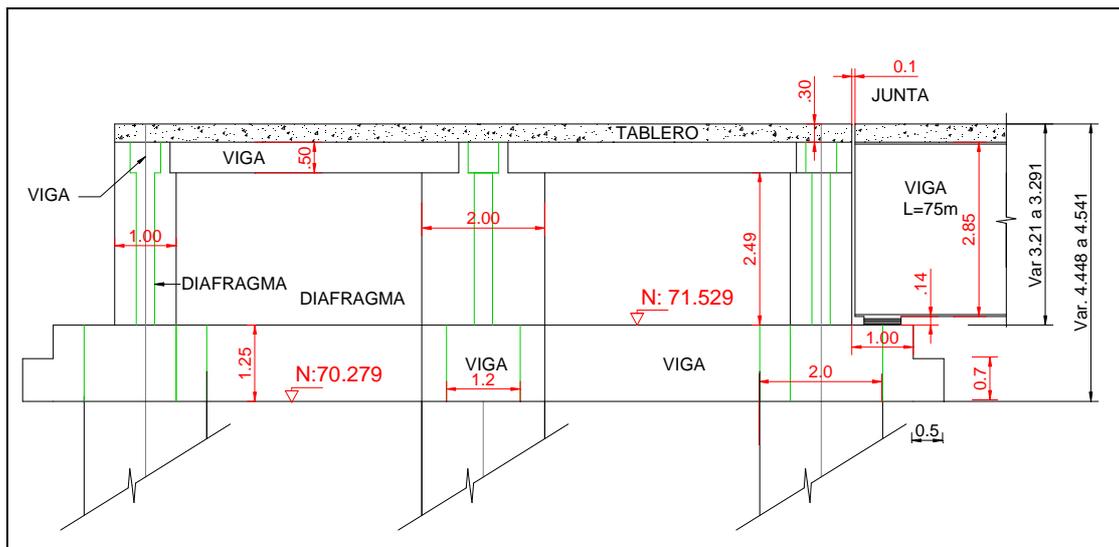


Figura 5 Vigas de hormigón sobre apoyos y detalle de apoyos de neopreno.

En la figura 5 se ha colocado el apoyo de neopreno y la viga de acero de 75 m., de longitud únicamente en el lado derecho pero también existe lo mismo en el apoyo izquierdo, no se lo dibujó para no complicar la explicación. Por este último motivo no se indica nada de las vigas transversales, que se aprecian en la figura 5.

12. PROGRAMAS ESPECÍFICOS DE CEINCI-LAB

CEINCI-LAB es un software educativo y práctico desarrollado por Aguiar (2010) que contiene una serie de programas para el: análisis estático de estructuras, análisis sísmico de puentes, estructuras con aisladores de base, entre otros temas.

Con el desarrollo de este artículo se incorporan por una parte nuevos programas a **CEINCI-LAB**, los mismos que se indican en este apartado y por otra parte se realiza el análisis sísmico completo en sentido longitudinal en los siguientes apartados, utilizando todos los programas existentes en la carpeta denominada **Carrizal** de CEINCI-LAB

12.1.1 Estribo Izquierdo

En la figura 6, se muestra el modelo numérico de análisis del estribo Quiroga que se halla sobre 16 pilotes, cuatro en el ala izquierda, ocho en la parte central y cuatro en el ala derecha. Se realiza un análisis sísmico en 2 dimensiones, por esa razón es que se aprecian dos pilotes.

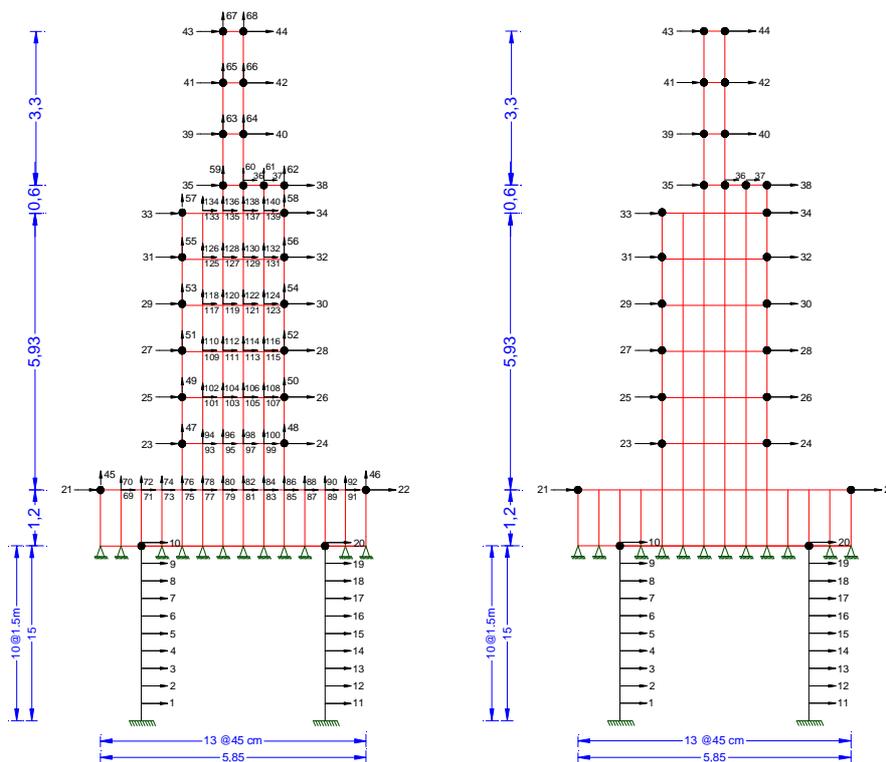


Figura 6 Modelo numérico de estribo izquierdo.

Lo que interesa ilustrar es que los pilotes han sido modelados con elementos finitos lineales que tienen tres grados de libertad por nudo, un desplazamiento horizontal, un desplazamiento vertical y una rotación. Se consideraron 10 elementos finitos en cada pilote; se

obtuvo la matriz de rigidez de los pilotes de 60 por 60 y luego se condensó a 20 por 20. Aguiar (2004). Los grados de libertad que se indican a la izquierda de la figura 6, referentes a los pilotes, son las coordenadas principales. La matriz de masa de los pilotes es de 20 por 20 y se halla en forma similar al de la matriz de rigidez pero utilizando la matriz de masa del elemento finito de masa uniforme distribuida.

En el estribo, propiamente dicho, se trabajó con elementos finitos rectangulares con dos grados de libertad por nudo. La base de los estribos se halla apoyada sobre el suelo y otra sobre los pilotes. En este caso las masas se concentró en puntos discretos señalados con un círculo.

Para el estribo se indica a la izquierda de la figura 6 todos los grados de libertad contados a partir de la última coordenada principal de los pilotes. Se halló la matriz de rigidez de toda la estructura de 168 por 168 y se condensó a las 44 grados de libertad indicadas a la derecha de la figura 6.

El programa que obtiene la matriz de rigidez y de masas (de 44 por 44) en las coordenadas principales indicadas a la derecha de la figura 6 se denomina ***rigidez_estribo_izquierdo***.

12.1.2 Apoyos Centrales

En dos dimensiones se aprecian tres pilotes y cuatro vigas; las vigas superiores son de hormigón armado y las inferiores son de acero. De paso se indica la forma como se numeran los grados de libertad en ***CEINCI-LAB***, para el caso de los pilotes. Todo esto lo hace el programa, solamente se indica para que el lector comprenda como se trabajan los pilotes. A la izquierda de la figura 7 se muestran las coordenadas totales de la estructura y a la derecha las coordenadas principales.

Primero se numeran todos los desplazamientos horizontales, empezando desde el pilote izquierdo, de abajo hacia arriba; después todos los grados verticales y finalmente las rotaciones. Las vigas del apoyo central, también han sido analizadas con elementos finitos lineales con masa uniforme distribuida.

Para usar los programas de la librería de ***CEINCI-LAB***, primero se numeran los elementos de los pilotes; luego se numeran las vigas empezando desde la viga superior como se observa en la figura 8; los números que están fuera del círculo corresponden a la numeración de los nudos y los que se encuentran dentro del círculo a la numeración de los elementos. El programa que determina la matriz de rigidez y la matriz de masas del apoyo central, en ***CEINCI-LAB*** se denomina ***rigidez_apoyo_central***

Si el usuario de ***CEINCI-LAB*** quiere trabajar con más elementos finitos en los pilotes. Tiene que hacer un nuevo programa pero basado en ***rigidez_apoyo_central***, para lo cual se recomienda cambiar de nombre el programa e indicar el número de elementos finitos (ne). Pero tendrá que dibujar la estructura para saber cual es el nudo inicial y el nudo final de las vigas, información que debe modificar al programa inicial en el cual está trabajando. No hay más cambios.

Si tiene dos ejes de pilotes o más de tres ejes de pilotes, en el nuevo programa que está realizando, utilizando ***rigidez_apoyo_central***, debe indicar el número de ejes de pilotes que tenga (np); Encontrar una ecuación para encontrar el número total de elementos de la estructura y cambiarla por que la que está actualmente es para el caso de 44 elementos. Hay más cambios que se deben realizar para ello se recomienda que se vea todo el programa y se vayan realizando los cambios respectivos. Este al igual que todos los programas de ***CEINCI-LAB***, están muy bien comentados.

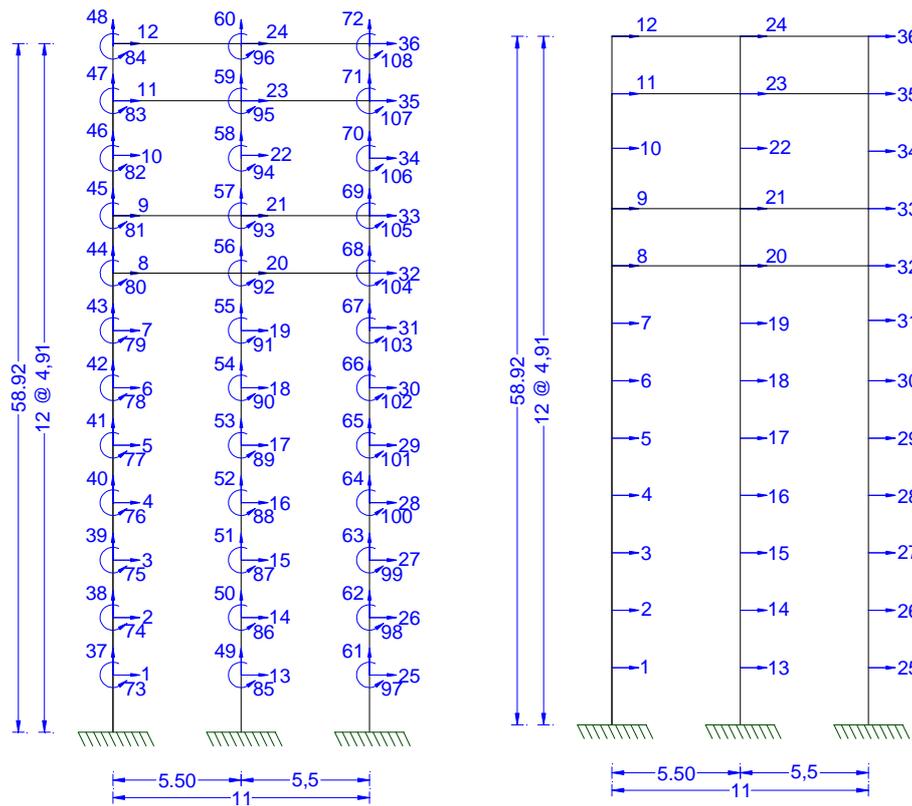


Figura 7 Coordenadas Totales y Coordenadas principales de un apoyo central.

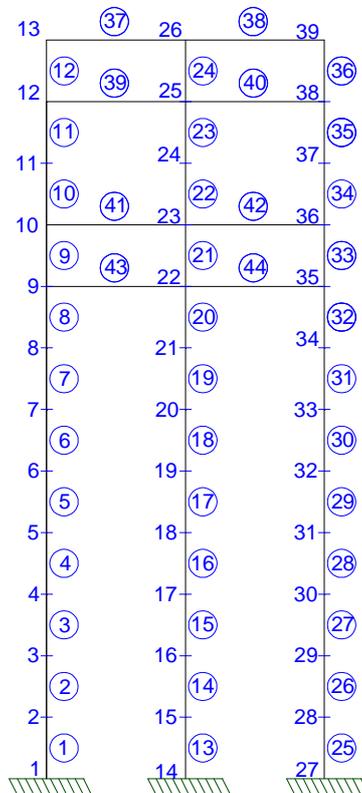


Figura 8 Numeración de nudos y elementos de apoyo central.

Los elementos del 1 al 11 del apoyo central tienen un diámetro de 2.0 m., el elemento 12 tiene un diámetro de 1.0 m., por que hay una reducción de la sección para que se apoyen las vigas de 75 m. Todos los elementos de la pila central son de 2.0 m., en la tercera fila los elementos que van desde el 25 al 35 son de 2.0 m., de diámetro y el elemento 36 de 1.0 m., de diámetro. En el programa **rigidez_apoyo_central**, se programó esto en pocas líneas, básicamente lo que se hizo fue un bucle desde el elemento 1 hasta el elemento $np * ne$ y dentro de este bucle hay una pregunta ¿Es el elemento 12 o 36?, en caso afirmativo el diámetro es 1.0 m., caso contrario 2.0 m.

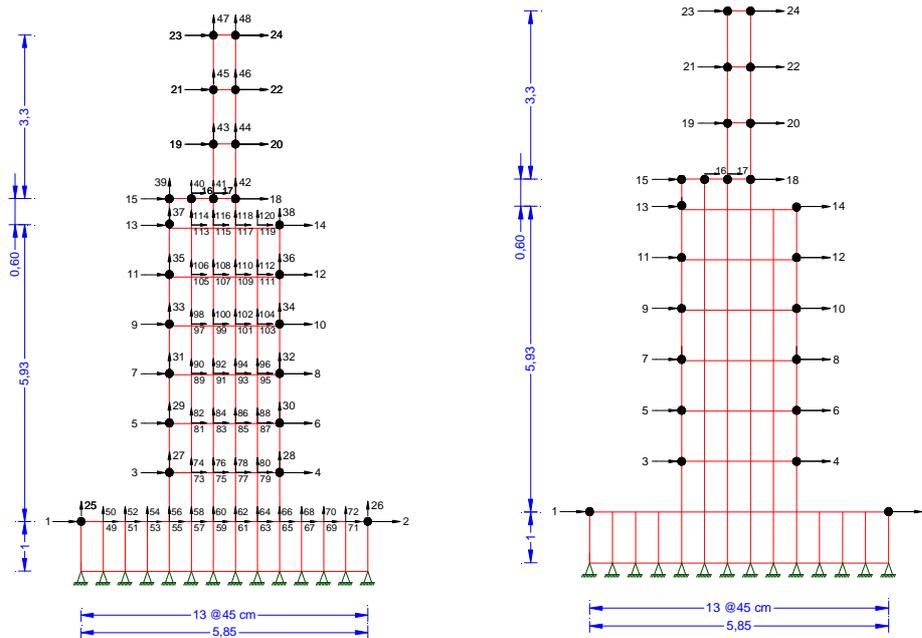


Figura 9 Modelo numérico de estribo derecho.

Para las vigas de hormigón se indican la base y la altura de cada una de ellas. Para las vigas de acero se indica el área y el momento de inercia de la sección transversal. Hay varias formas de ingresar estos datos, una de ellas es la que consta en **rigidez_apoyo_central**.

12.1.3 Estribo derecho

El estribo derecho es similar al estribo izquierdo pero dado la vuelta y la cimentación no tiene pilotes. Todo lo indicado en 2.1.1 es aplicable para este estribo, por lo que se van a dar algunos comentarios adicionales de cómo se realizó el programa **rigidez_estribo_derecho**.

La primera fila de elementos finitos corresponde a la cimentación que tiene una altura de 1.0 m., la profundidad de este elemento que no se ve en la figura 9 es de 12.0 m. Para la cimentación se pudo haber trabajado con 2 elementos finitos en sentido Y, con lo que la altura de cada elemento en sentido vertical sería de 0.50 m.

Para los elementos finitos que se hallan sobre la cimentación se deben agrupar los elementos finitos que corresponden a la pantalla y los elementos finitos que son de los contrafuertes; debido a que la profundidad es diferente. Para los elementos finitos de la pantalla ésta profundidad es de 11.0 m.; en cambio para los contrafuertes la profundidad es 1.60 m. Nótese que en la profundidad se han considerado 4 contrafuertes que son los que se encuentran en la parte central del estribo. (Hipótesis de cálculo).

La profundidad de los contrafuertes se obtuvo sumando su espesor (Criterio adoptado para encontrar el espesor del conjunto). Se puede aplicar otros criterios más refinados para encontrar el espesor equivalente uno de ellos es en base al momento de inercia. En este caso primero se debe determinar el centro de gravedad de todos los contrafuertes a una determinada altura ya que son de sección variable; segundo se halla el momento de inercia de todos los contrafuertes con respecto al centro de gravedad y finalmente se halla el espesor equivalente de tal manera que se tenga el mismo momento de inercia. Aguiar y Espinoza (2010).

Luego se dan los datos de la viga superior sobre la cual se asientan las vigas de acero de 75 m., y que soportan a la pantalla superior. La altura de esta viga es de 0.60 m. Si se desea se puede considerar 2 elementos finitos en sentido vertical en lugar de uno, como se cálculo; en este caso la altura de cada elemento es 0.30. Finalmente, se dan los datos de los elementos finitos de la pantalla superior.

12.1.4 Vigas de acero

En cada viga de acero se consideró 150 divisiones en sentido X (Luz de 75 m.) y 3 divisiones en sentido Y (Altura de la viga de 3.0 m.). De tal manera que en cada viga se ha trabajado con 450 elementos finitos de 0.50 m., por 1.00 m. En la figura 10 se muestra la numeración de los grados de libertad, las masas se concentraron en los nudos exteriores por este motivo se numeran primero los grados de libertad de estos nudos, ya que éstas son las coordenadas principales. Nótese que en sentido horizontal se tienen 8 coordenadas principales y en sentido vertical se tienen 6 coordenadas principales más. Luego se numeran todos los demás grados de libertad. En la parte inferior de la figura 10 se indica un detalle del apoyo de Neopreno, (Toapanta 2009), el mismo que ha sido modelado como un resorte de rigidez lineal.

Si se desea realizar el análisis sísmico para la componente horizontal y vertical de movimiento del suelo, una vez obtenida la matriz de rigidez de la estructura por ensamblaje directo se condensa a una matriz de 14 por 14. Ahora, cuando solo se realiza el análisis sísmico para la componente horizontal la condensación se hace a una de 8 por 8.

En la figura 11 se indican las secciones transversales del perfil tipo *I* a lo largo de la viga, en los extremos tiene una menor sección y en el tramo central una mayor sección. En la parte inferior de la gráfica se muestra la abscisa *X*., hasta el centro de luz ya que es simétrica la viga. En la tabla 1 se indican los espesores equivalentes como si se tratara de una viga rectangular que tiene el mismo momento de inercia de la viga *I*.

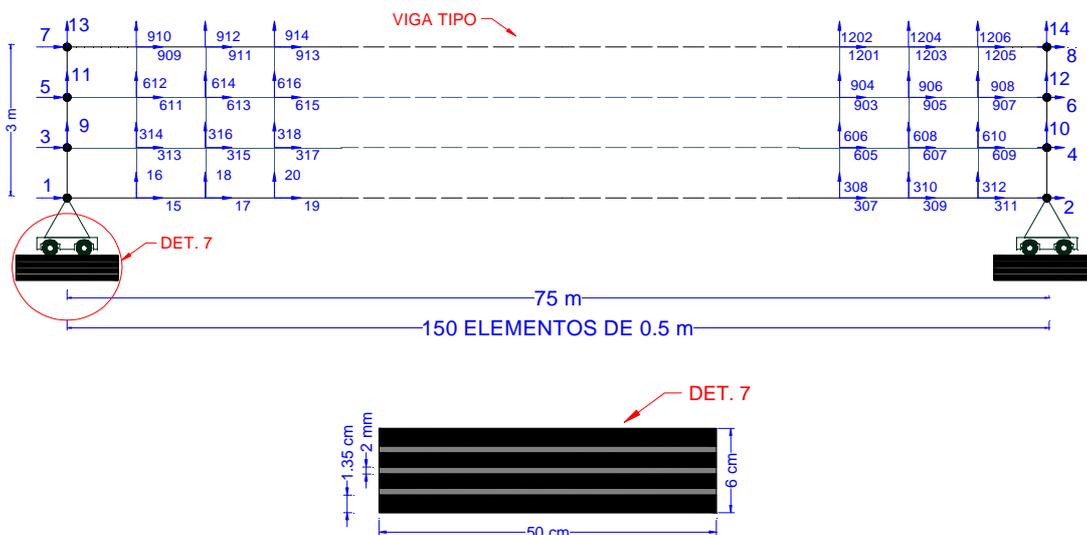


Figura 10 Numeración de los grados de libertad de una viga.

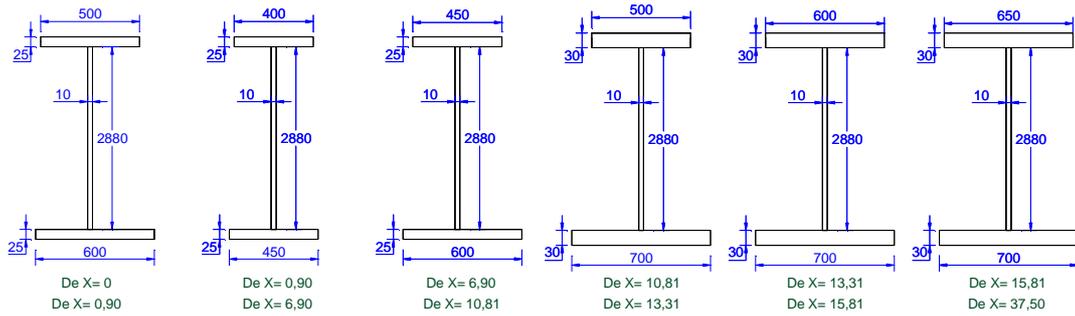


Figura 11 Secciones transversales de las vigas de acero

Tabla 1 Espesores equivalentes.

x	0 a 0.5 m.	0.5 a 6.9 m.	6.9 a 10.81 m.	10.81 a 13.31 m.	13.31 a 15.81 m.	15.81 a 37.50 m.
e (cm.)	3.71	3.09	3.57	4.48	4.83	4.99

El programa que determina la matriz de rigidez y de masas en coordenadas principales se denomina: *rigidez_viga_superior*.

13. MODELO NUMÉRICO DE ANÁLISIS

En la figura 12 se muestra una vista en el sentido de análisis sísmico, que se considera en este artículo. Nótese que el estribo izquierdo tiene pilotes y el estribo derecho no los tiene. De igual manera se aprecia que los pilotes de los apoyos centrales tienen longitudes mucho más altas que los pilotes del estribo izquierdo.

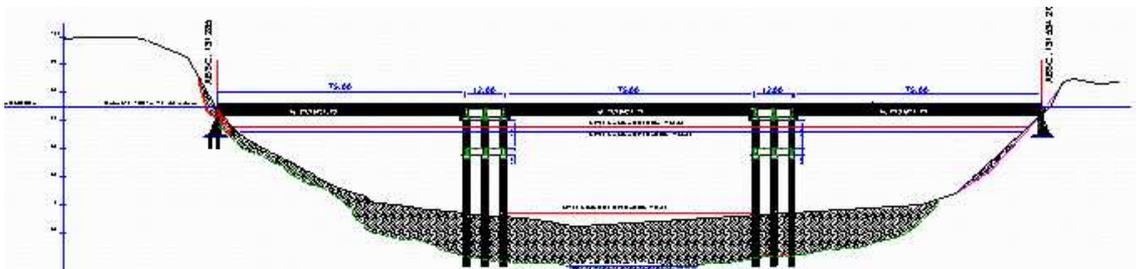


Figura 12 Modelo numérico del puente en sentido longitudinal.

En la parte superior de la figura 13 se muestran las coordenadas principales (grados de libertad horizontal) del puente Carrizal. Para que se pueda ver de mejor forma, en la parte superior se indican los grados de libertad del estribo izquierdo con sus respectivos pilotes, de los apoyos centrales y del estribo derecho.

En la parte inferior de la figura 13, se muestran los grados de libertad horizontales de las vigas de acero; la primera corresponde a la viga que se encuentra entre el estribo izquierdo y el apoyo central; la segunda a la viga que se halla entre los dos apoyos y la tercera a la viga que se halla entre el segundo apoyo y el estribo derecho. Es importante saber identificar los grados de libertad, considerados para el reporte de resultados que se darán posteriormente.

En total se tiene 164 coordenadas principales. Luego las matrices de rigidez, masa y amortiguamiento con las cuales se realiza el análisis sísmico son de ese orden. Se debe destacar que el suelo fue modelado mediante resortes de comportamiento no lineal. Las

propiedades de la curva carga deformación del suelo están indicadas en Aguiar *et al.* (2010) y fueron inferidas del estudio de suelos realizado por Beltrán (2009), Se considero que el suelo tiene un comportamiento elasto perfectamente plástico.

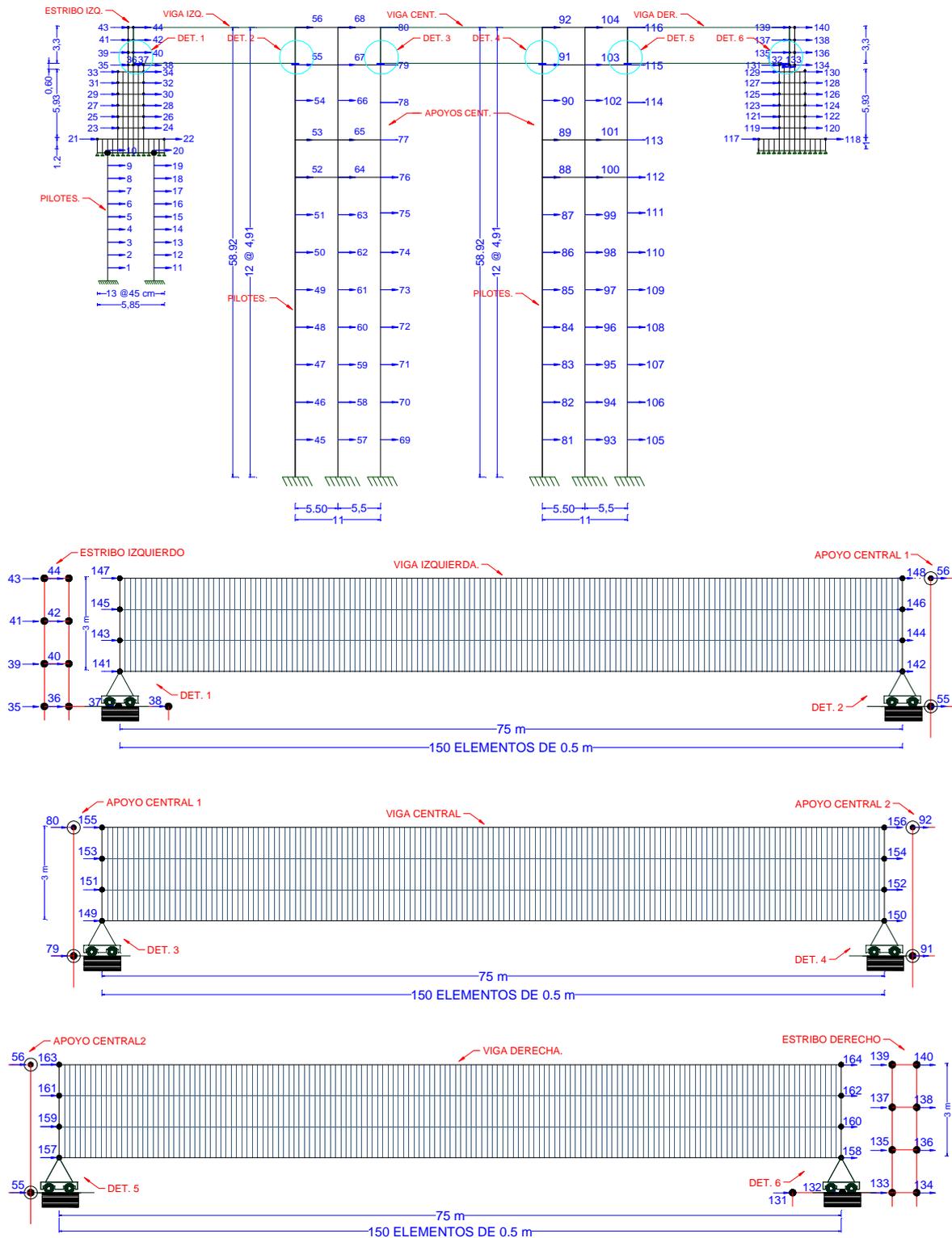


Figura 13 Coordenadas Principales de modelo de análisis sísmico longitudinal.

14. EMPUJE ACTIVO DEL SUELO

Cuando la estructura está en reposo, existe un empuje del suelo sobre los dos estribos del puente; empuje que genera desplazamientos en estos elementos estructurales. En el artículo se encontró la respuesta sísmica de dos formas, considerando la presión que el suelo transmite a los estribos y sin considerar esta presión.

Para el primer modelo se halló la fuerza horizontal F en cada uno de los grados de libertad del estribo izquierdo, como se indica en la parte izquierda de la figura 14. Luego se obtuvo el vector de cargas generalizadas Q y se calculó los desplazamientos horizontales q en dichos grados de libertad. Aguiar (2004).

$$F = \frac{\gamma h^2}{2} b_s \quad (1)$$

Donde γ es el peso específico del suelo; h es la altura desde la superficie al punto donde se desea calcular la fuerza F ; b_s es el ancho del volumen de suelo considerado en el análisis, se trabajó con $b_s = 10 \text{ m}$.

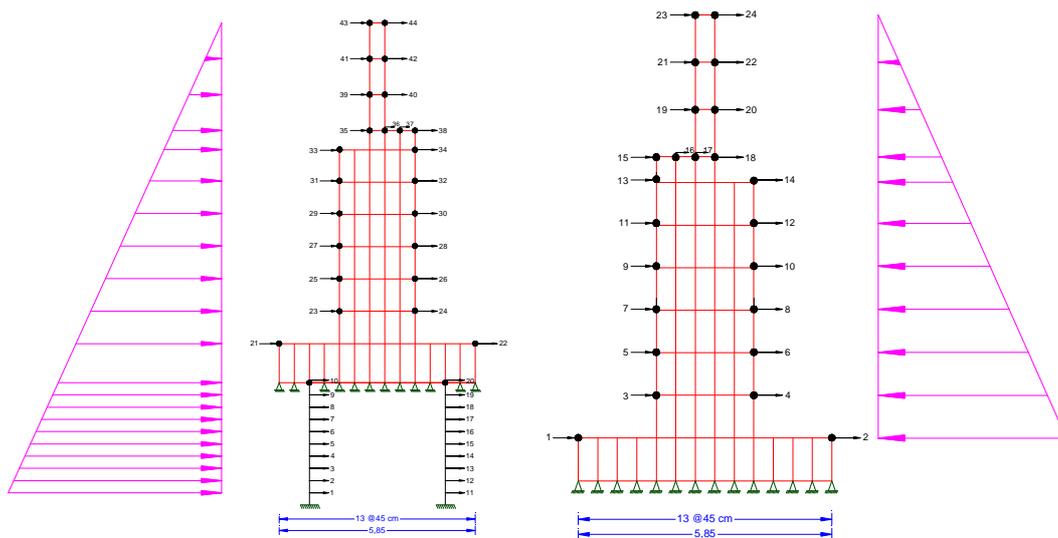


Figura 14 Fuerzas estáticas actuando en los estribos, debido al suelo.

Cuando las cargas actúan en los nudos, la obtención del vector de cargas es directo. Ahora bien, en la figura 6 se muestran las coordenadas principales del estribo izquierdo. Por lo tanto, se puede trabajar con un vector de cargas Q de 44 elementos y hallar los desplazamientos horizontales q , resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones lineales.

$$Q = KEI q \quad (2)$$

Siendo KEI la matriz de rigidez del estribo izquierdo condensada a las coordenadas laterales de 44 por 44. Q el vector de cargas compuesta por valores en los grados de libertad donde empuja el suelo y los demás nulos; q es el vector de desplazamientos de 44 por 1.

En forma similar se trabaja en el estribo derecho. En este caso las fuerzas F son negativas debido a que las fuerzas del suelo están actuando en sentido contrario a la dirección positiva de los grados de libertad. Se hallan los desplazamientos en el estribo derecho y con todos los desplazamientos se tiene el vector de condiciones iniciales q para $t = 0$.

Por lo tanto, en el modelo 1, se obtuvo la respuesta en el tiempo con condiciones iniciales diferentes de cero; es para el caso en que se considera empuje de suelo y en el modelo 2, se encontró la respuesta con vector $q = 0$ para $t = 0$, es para el caso en que no se considera el empuje de suelo.

15.ELEMENTOS FINITOS Y SISMO DE ANÁLISIS

Los pilotes fueron modelados con elementos finitos lineales, con masa uniforme distribuida. Aguiar (1981). Las funciones de forma con las cuales se halla la matriz de rigidez y de masas, son las siguientes:

$$\begin{aligned} \phi_1(x) &= 1 - \frac{X}{L} & \phi_2(x) &= 1 - 3\frac{X^2}{L^2} + 2\frac{X^3}{L^3} & \phi_3(x) &= X\left(1 - \frac{X}{L}\right)^2 \\ \phi_4(x) &= \frac{X}{L} & \phi_5(x) &= \frac{X^2}{L^2}\left(3 - 2\frac{X}{L}\right) & \phi_6(x) &= -\frac{X}{L}\left(1 - \frac{X}{L}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

Siendo L , la longitud del elemento y X la abscisa de un punto del elemento. Los elementos de la matriz de rigidez k , y de masas m de un elemento, se obtienen a partir de las funciones de forma, con las expresiones siguientes:

$$k(i, j) = \int_0^L EI \phi_i'' \phi_j'' dx \quad m(i, j) = \int_0^L \bar{m} \phi_i \phi_j dx \quad (4)$$

Donde EI es la rigidez a flexión del elemento; \bar{m} es la masa por unidad de longitud. Se obtuvo la matriz de rigidez y de masas por ensamblaje directo y luego se condensa estas matrices a los grados de libertad horizontales. Aguiar (2004, 2007).

Para los estribos propiamente dicho se trabajó con elementos finitos rectangulares; con dos grados de libertad por nudo, desplazamiento horizontal y vertical; con el propósito de contemplar la flexión en el centro de gravedad del elemento se consideró cuatro grados de libertad más. Las funciones de forma utilizadas en coordenadas naturales se presenta en la tabla 2. Oñate (1992).

Se trabajó con dos puntos de la cuadratura de gauss, en cada sentido, para hallar la matriz de rigidez del elemento finito, con la siguiente ecuación:

$$k = \int_V B^t E B dV \quad (5)$$

Donde k es la matriz de rigidez de un elemento finito; V es el volumen; B es la matriz que relaciona los esfuerzos con las deformaciones es una matriz de 3×12 ; E es la matriz de elasticidad para el caso de tensión plana. En función del espesor e del elemento, la ecuación (5) se transforma en:

$$k = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 B^t E B \det(J) e dA \quad (6)$$

Las variables no definidas son dA que es el diferencial de área; J la matriz Jacobiana; $\det(J)$ es el determinante de la matriz Jacobiana, que reporta el área de influencia en el punto de la cuadratura de gauss.

Tabla 2 – Funciones de forma para elementos finitos rectangulares

Coordenada natural	Coordenada Centroidal	Deformada elemental	Función de Forma
1		$u1$	$\phi_1 = 0.25(-s+1)(-t+1)$
		$v1$	$\phi_1 = 0.25(-s+1)(-t+1)$
2		$u2$	$\phi_2 = 0.25(s+1)(-t+1)$
		$v2$	$\phi_2 = 0.25(s+1)(-t+1)$
3		$u3$	$\phi_3 = 0.25(s+1)(t+1)$
		$v3$	$\phi_3 = 0.25(s+1)(t+1)$
4		$u4$	$\phi_4 = 0.25(-s+1)(t+1)$
		$v4$	$\phi_4 = 0.25(-s+1)(t+1)$
	5	$u5$	$\phi_5 = 1 - s^2$
		$v5$	$\phi_5 = 1 - s^2$
	6	$u6$	$\phi_6 = 1 - t^2$
		$v6$	$\phi_6 = 1 - t^2$

En la figura 15 se indica el acelerograma artificial utilizado, tiene una duración de 20 s., una aceleración máxima del suelo de $0.4 g$., siendo g la aceleración de la gravedad. A la derecha de la figura 15 se muestra el espectro de respuesta elástico para un 5% de amortiguamiento. El acelerograma artificial generado es compatible con el espectro del Código Ecuatoriano de la Construcción, CEC-2000 para un perfil de suelo S3.

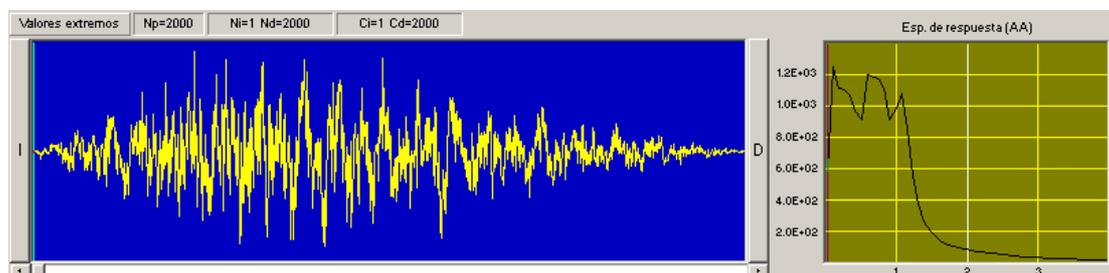


Figura 15 Acelerograma utilizado y espectro elástico.

16.RESULTADOS EN ESTRIBO IZQUIERDO

En la parte superior de la figura 16 se muestra la historia de desplazamientos horizontales en el estribo izquierdo, hallados con el modelo 1 y en la parte inferior de dicha

figura la respuesta en el tiempo encontrada con el modelo 2. Como era de esperarse son mayores los desplazamientos encontrados con el modelo 1 (empuje activo del suelo). En términos generales se puede indicar que el estribo es bastante rígido y los desplazamientos esperados son bastante bajos.

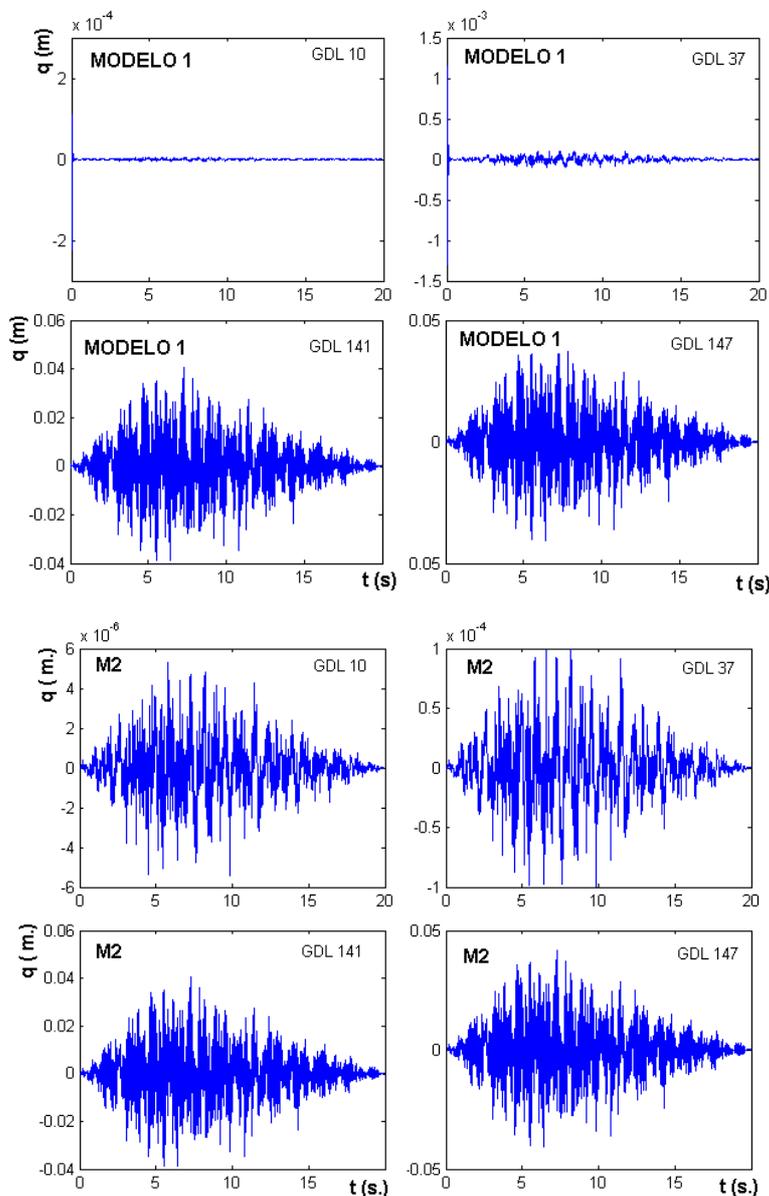


Figura 16 Respuesta en Estribo Izquierdo con dos modelos.

Los grados de libertad seleccionados son el 10 (Punto superior de los pilotes), 37 (Bajo el apoyo de Neopreno), 141 (Sobre el apoyo de Neopreno), 147 (En la parte superior de la viga de acero, del apoyo de Neopreno). Es interesante notar la diferencia de desplazamientos bajo el apoyo de Neopreno y sobre el apoyo de Neopreno; los desplazamientos sobre el apoyo son mayores y es debido a que el Neopreno trabaja como un aislador elastomérico.

En la figura 17 se muestran los resultados encontrados con el modelo 2 (no considera empuje del suelo) en los mismos grados de libertad. Nótese que las fuerzas horizontales son bastantes bajas, debido a que los desplazamientos laterales son pequeños.

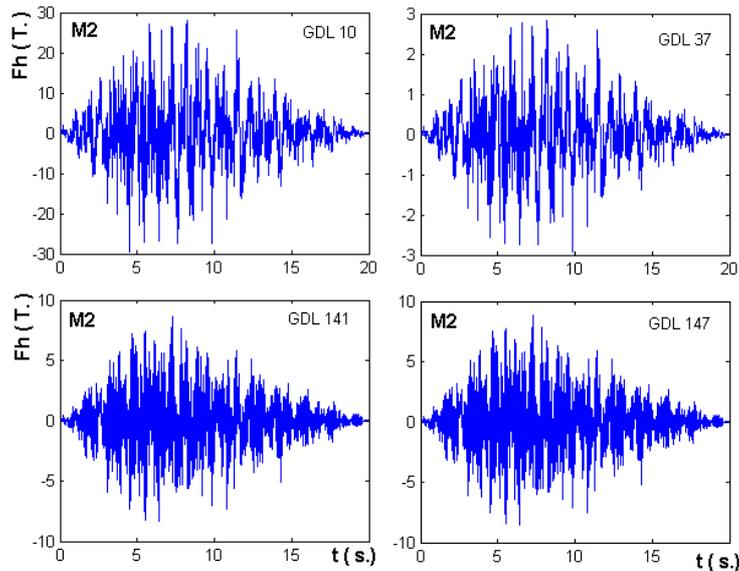


Figura 17 Fuerzas horizontales encontradas con modelo 2.

17.RESULTADOS EN APOYOS CENTRALES

En la figura 18 se muestran la respuesta en el tiempo de desplazamientos hallados con el modelo 1, en el apoyo central. Se presenta en los grados de libertad 52 (viga de arriostramiento inferior de acero), 53 (viga de arriostramiento superior de acero); 55 (viga inferior de hormigón armado) y 56 (viga superior de hormigón armado).

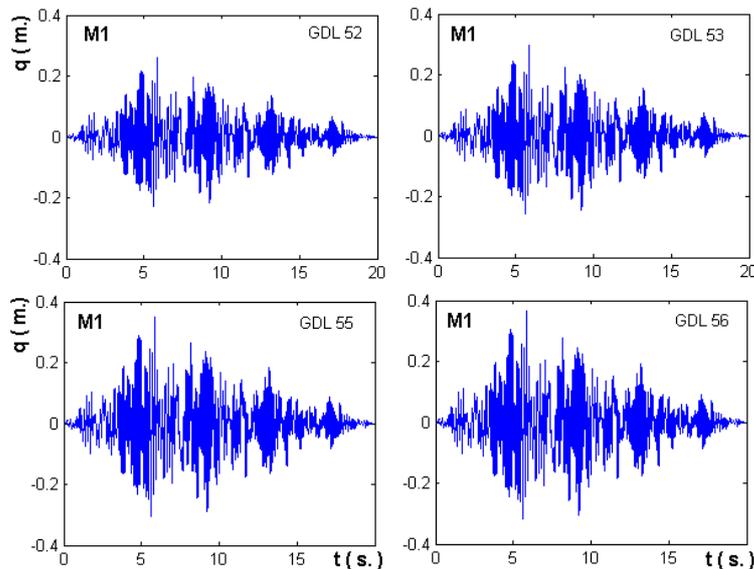


Figura 18 Respuesta de desplazamientos en apoyo central.

Los desplazamientos hallados con el modelo 2 son similares a los encontrados con el modelo 1, razón por la que se omite su presentación. El desplazamiento máximo en el grado de libertad 52 está alrededor de los 25 cm.; el grado de libertad 53 está en el orden de los 30 cm.,

el 55 en 35 cm., y el 56 en 36 cm. Indudablemente que la presencia de las vigas ha reducido los desplazamientos relativos especialmente entre los grados de libertad 55 y 56.

Como era de esperarse los desplazamientos laterales en el apoyo central son mucho más altos que los desplazamientos laterales de los estribos. Es importante destacar que en los dos modelos no se ha incluido el amortiguamiento que proporciona el Neopreno a la estructura, únicamente se lo modeló como un resorte cuya rigidez es función del área de la goma que trabaja al corte, del módulo de corte de la goma y de la sumatoria de la altura de las gomas. Al considerar el amortiguamiento en el modelo de seguro que van a disminuir los desplazamientos laterales.

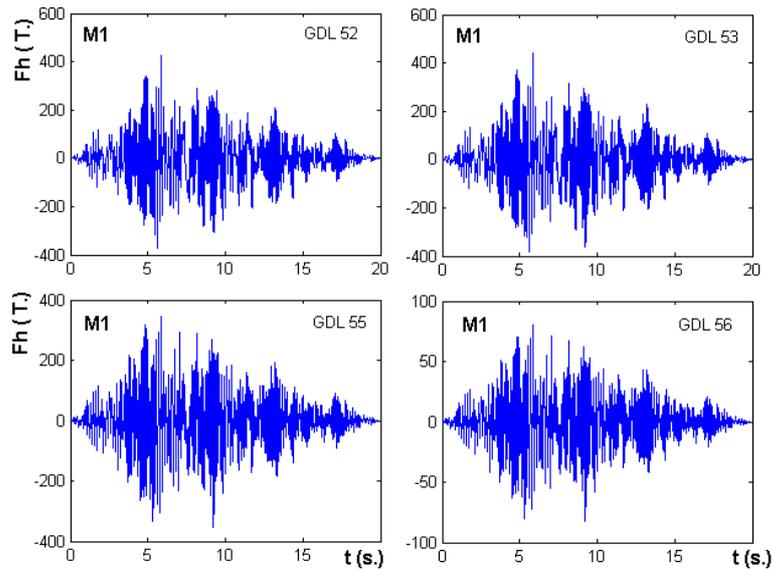


Figura 19 Fuerzas horizontales en apoyo central.

En la figura 19 se muestra la respuesta de las fuerzas horizontales, a nivel de las vigas de acero son bastante altas y a nivel de las vigas de hormigón disminuyen, especialmente en la viga superior.

18.RESULTADOS EN ESTRIBO DERECHO

Los resultados encontrados en el estribo derecho, son similares a los hallados en el estribo izquierdo, en el sentido de que con el modelo 2 los desplazamientos son menores en relación al modelo 1 y que estos desplazamientos son mucho menores a los desplazamientos encontrados en los apoyos.

En la figura 20 se muestran los resultados de desplazamientos, los indicados en la parte superior corresponden al modelo 1 y los indicados en la parte inferior al modelo 2. Se presenta para el grado de libertad 118 (inicio de la pantalla inferior del estribo); 132 (bajo el apoyo de Neopreno); 158 (sobre el apoyo de neopreno) y 164 (sobre la viga de acero de 75 m., de longitud).

Las fuerzas horizontales en el estribo derecho son menores a las encontradas en el estribo izquierdo y con un comportamiento muy similar.

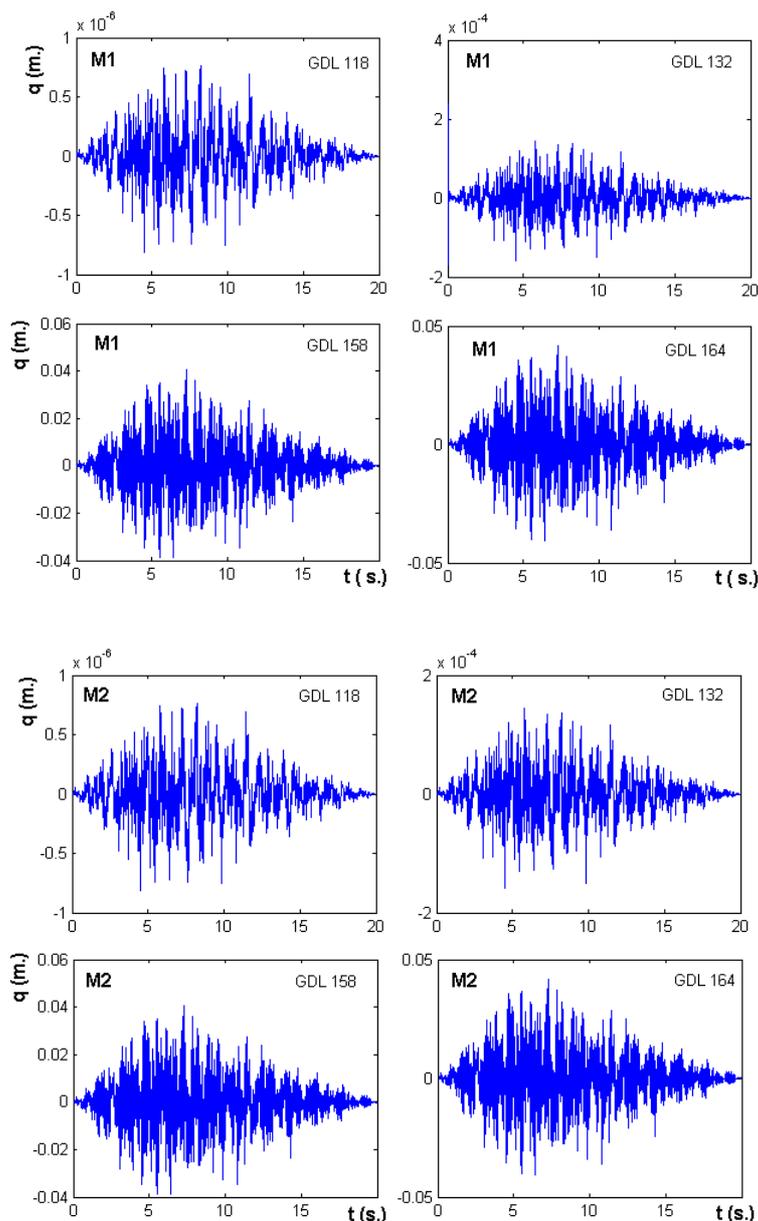


Figura 20 Desplazamientos hallados con los dos modelos en estribo derecho.

19. CONCLUSIONES

Se inició el artículo detallando la forma de los estribos del puente sobre el río Carrizal, tanto del que se encuentra sobre pilotes como el que no lo está. Posteriormente se pasó a describir la geometría de los apoyos del puente compuesta por nueve pilotes circulares y cuatro filas de vigas, finalmente se explicó la geometría de las vigas de acero de 75 m., de longitud que se sustentan en los estribos y los apoyos del puente de 292.20 m., de longitud. Era necesaria esta descripción para entender los modelos numéricos de análisis, tanto a nivel de subestructuras como de estructura completa.

Para cada una de las subestructuras se ha presentado el modelo numérico con el cual se obtuvo un programa de computación que ha sido incorporado el programa **CEINCI-LAB** que permite encontrar las matrices de rigidez y de masas en coordenadas laterales. Al final en el

anexo 1, de este artículo se muestra el programa completo para el análisis sísmico del puente Carrizal, utilizando la librería de programas de **CEINCI-LAB**. Se destaca que todos los programas para el análisis sísmico de un determinado puente se hallan en una carpeta con el nombre del puente.

Finalmente, se comparó la respuesta en términos de desplazamientos y de fuerzas de la respuesta que se obtuvo al realizar el análisis sísmico considerando el empuje lateral del suelo sobre los estribos (modelo 1) y al no considerar el empuje lateral del suelo (modelo 2). Evidentemente que los desplazamientos obtenidos con el modelo 2 fueron ligeramente mayores a los encontrados con el modelo 1, en los estribos. Por lo tanto, el empuje activo del suelo sobre los estribos debe ser modelado en todo análisis sísmico de puentes.

AGRADECIMIENTO

Al Mayor Ing. Enrique Morales Moncayo, Jefe del Grupo Vial Manabí, responsable de la construcción de la carretera Quiroga-Pichincha, de la cual forma parte el puente sobre el río Carrizal, por toda la información suministrada para realizar este trabajo.

REFERENCIAS

1. Aguiar R., (2004), *Análisis Matricial de Estructuras*, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército. Editorial Ediespe, Tercera edición 550 p, Quito, Ecuador.
2. Aguiar R., (2007), *Dinámica de Estructuras con MATLAB*, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército. Editorial Ediespe, Primera edición 292 p, Quito, Ecuador.
3. Aguiar R., (1981), *Apuntes de clase de Dinámica de Estructuras*. Prof. Simón Lamar. Instituto de Materiales y Modelos Estructurales. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
4. Aguiar R., (2008), *Análisis Sísmico de Edificios*, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, 320 p., Quito, Ecuador.
5. Aguiar R., Almazán J., Dechent P., Suárez V., (2008), *Aisladores de base elastoméricos y FPS*, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, Quito, 292 p.
6. Aguiar R., (2010), *CEINCI-LAB un software educativo y práctico*. Centro de Investigaciones Científicas, Escuela Politécnica del Ejército, Versión Digital. Quito.
7. Aguiar R., Espinoza D., (2010), "Análisis sísmico de apoyos centrales de puente sobre el río Carrizal", *I Congreso Nacional de Geotecnia. Colegio de Ingenieros Civiles de Pichincha*, 25-44, Quito.
8. Beltrán F., (2009), *Informe de suelos. Curvas Carga Deformación ante ensayos cíclicos*. Geosuelos Cia. Ltda., Quito.
9. CEC-2000 Código Ecuatoriano de la Construcción. *Capítulo 1 Peligrosidad Sísmica*. Quito, Ecuador.


```

CAA=zeros(8,8);%Quinta fila
ngl=164;% NUMERO TOTAL DE GRADOS DE LIBERTAD (COORD. PRINCIPALES)
%-----MATRIZ DE RIGIDEZ -----
KT=[KEI  CEC  CEC  CED  CEA  CEA  CEA;
    CEC'  KEC  CCEC  CCED  CCA  CCA  CCA;
    CEC'  CCEC  KEC  CCED  CCA  CCA  CCA;
    CED'  CCED'  CCCED'  KED  CA  CA  CA;
    CEA'  CCA'  CCCA'  CA'  KA  CAA  CAA;
    CEA'  CCA'  CCCA'  CA'  CAA  KA  CAA;
    CEA'  CCA'  CCA'  CA'  CAA  CAA  KA];
%-----MATRIZ DE MASAS-----
MT=[MEI  CEC  CEC  CED  CEA  CEA  CEA;
    CEC'  MEC  CCEC  CCED  CCA  CCA  CCA;
    CEC'  CCEC  MEC  CCCED  CCA  CCA  CCA;
    CED'  CCED'  CCCED'  MED  CA  CA  CA;
    CEA'  CCA'  CCCA'  CA'  MA  CAA  CAA;
    CEA'  CCA'  CCCA'  CA'  CAA  MA  CAA;
    CEA'  CCA'  CCCA'  CA'  CAA  CAA  MA];
%-----CONTRIBUCIÓN DE NEOPRENO, DE DUREZA 70, SHORE 70 -----
kb=324*4; %rigidez de neopreno de 50 por 50 por 6 cm: Con 3 capas de acero de 2 mm. Ga =7.0
Kg/cm2
PR=[37 kb; %Número de grado de libertad y rigidez horizontal
    132 kb; 141 kb; 142 kb; 149 kb; 150 kb; 157 kb; 158 kb];
[Kaisla]=resortes_carrizal(ngl,PR);% el programa sirve para FPS y Neopreno.
%-----MATRIZ DE RIGIDEZ CON CONTRIBUCIÓN DE NEOPRENO-----
KT=KT+Kaisla;
%-----
% Vectores Jh para sismo horizontal
for i=1:ngl; Jh(i)=1; end; Jh=Jh';
% Características del suelo solo de un pilote (Considera tres resortes por nudo)
%[PROP]=[GDL,FH,FV,Mom,dh,dv,dteta,dhu,dvu,dtetau] Modelo Elastoplastic
%-----ESTRIBO IZQUIERDO-----
[PRO]=[10 22.0 22.0 0.0 0.60 0.60 0.0 1.70 1.70 0; %Arcilla Blanda
    9 25.0 25.0 0.0 0.60 0.60 0.0 1.70 1.70 0;
    8 25.0 25.0 0.0 0.60 0.60 0.0 1.70 1.70 0;
    7 160.0 160.0 0 0.075 0.075 0.0 0.090 0.090 0; %Arena meteorizada
    6 260.0 260.0 0 0.070 0.070 0.0 0.090 0.090 0;
    5 129.0 129.0 0 0.80 0.80 0.0 1.00 1.00 0; %Arcilla dura
    4 350.0 350.0 0 0.80 0.80 0.0 1.00 1.00 0;
    3 350.0 350.0 0 0.80 0.80 0.0 1.00 1.00 0;
    2 350.0 350.0 0 0.80 0.80 0.0 1.00 1.00 0;
    1 350.0 350.0 0 0.80 0.80 0.0 1.00 1.00 0];
[PROPESTI]=genera_gdl_resortes(PRO,2,10);
%-----PRIMER APOYO-----
[PROP1]=[47 25.0 25.0 0.0 0.60 0.60 0.0 1.70 1.70 0; %Arcilla Blanda
    46 129.0 129.0 0 0.80 0.80 0.0 1.00 1.00 0; %Arcilla dura
    45 350.0 350.0 0 0.80 0.80 0.0 1.00 1.00 0];
% Genera la rigidez de los resortes de los otros pilotes de primer apoyo
[PROPP1]=genera_gdl_resortes(PROP1,3,12);
%-----SEGUNDO APOYO-----
[PROP2]=[83 25.0 25.0 0.0 0.60 0.60 0.0 1.70 1.70 0; %Arcilla Blanda
    82 129.0 129.0 0 0.80 0.80 0.0 1.00 1.00 0; %Arcilla dura
    81 350.0 350.0 0 0.80 0.80 0.0 1.00 1.00 0];
% Genera la rigidez de los resortes de los otros pilotes de segundo apoyo
[PROPP2]=genera_gdl_resortes(PROP2,3,12);
%-----VECTOR CON TODOS LOS RESORTES DEL SUELO-----
[PROP]=[PROPESTI; PROPP1; PROPP2];%Contiene gdl y propiedades de todos los suelos
%-----EMPUJE ACTIVO DEL SUELO EN ESTRIBO IZQUIERDO-----
FT=zeros(44,1);
gama=1.6; % Peso específico del suelo
esuelo=10; %Ancho cooperante del suelo
for i=1:10;HI(i)=i*1.5;FT(i)=gama*(26.03-HI(i))^2*esuelo/2;end
HI(11)=16.20;FT(21)=gama*(26.03-16.20)^2*esuelo/2;
for i=1:6;HI(11+i)=16.20+i*0.99; FT(21+2*i)=gama*(26.03-HI(11+i))^2*esuelo/2;end

```

```

HI(18)=22.73;FT(35)=gama*(26.03-22.73)^2*esuelo/2;
for i=1:3;HI(18+i)=22.73+i*1.1; FT(37+2*i)=gama*(26.03-HI(18+i))^2*esuelo/2;end
qei=KEIFT; %Desplazamientos por empuje de suelo
%-----EMPUJE ACTIVO DEL SUELO EN ESTRIBO DERECHO-----
FD=zeros(24,1);
HD(1)=1.00; FD(2)=-gama*(10.84-1)^2*esuelo/2;
for i=1:6;HD(1+i)=1.0+i*0.99; FD(2+i*2)=-gama*(10.84-HD(1+i))^2*esuelo/2; end;
HD(8)=7.54;FD(18)=-gama*(10.84-7.54)^2*esuelo/2;
for i=1:3;HD(8+i)=7.54+i*1.1;FD(18+i*2)=-gama*(10.84-HD(8+i))^2*esuelo/2;end
qed=KED\FD; %Desplazamientos por empuje de suelo
%-----VECTOR DE CONDICIONES INICIALES-----
for i=1:74;qin(i)=0;end; qin=qin';for i=1:22;qfin(i)=0;end;qfin=qfin';
q=[qei;qin;qed;qfin];%Desplazamientos debido a empuje de suelo estático
%-----CONDICIONES INICIALES-----
%q=zeros(ngl,1); %Vector de desplazamientos
qp=q; %Vector de velocidades iniciales
%qa=zeros(ngl,1); %Vector de despla inic. (Coord. Principales)
qa=q;
qap=qa; %Vector de velocidades iniciales (Coord. Principales)
Y=[qa;qap]; % Vector Y de condiciones iniciales
zeda=0.05; %Factor de amortiguamiento de estructura
% Cargo Sismo
load rec_1s3
nn=length(ux);tu(1)=0;
ugx=0.01*ux; %Acelerograma viene en gals
for iji=1:nn-1
    iji
    acel=-ugx(iji);tu(iji+1)=iji*dT;
    for jji=1:6
        [KTT]=resortes_gdl_esmeraldas(q,KT,PROP);
        [T,phi,omega]=orden_eig(KTT,MT); %Frecuencias de vibración
        % MATRIZ DE AMORTIGUAMIENTO
        [CT]=amortiguamiento(MT,phi,omega,zeda);
    % Respuesta en el tiempo para sismo horizontal
    [Yn]=pee_de_uno(KTT,CT,MT,Jh,acel,dT,Y);
    qa=Yn(1:ngl);% Nuevos desplazamientos. Coordenadas Principales
    q=qa;% Nuevo vector de desplazamientos
    Q=KT*q;% Vector de Cargas Generalizadas
    Y=Yn; %Se actualiza el vector Y
    end
    for i=1:ngl
        qt(i,iji+1)=q(i); % Se almacena la respuesta en el tiempo
        Qt(i,iji+1)=Q(i); % Se almacena la respuesta en el tiempo
    end
end
% Valores Maximos en absoluto
for i=1:ngl
    qtmax(i)=max(abs(qt(i,:)));% Desplazamientos máximos
    Qtmax(i)=max(abs(Qt(i,:)));% Cargas máximas
end
%-----DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS EN ESTRIBOS-----
qmaxEi=[qtmax(1);qtmax(2);qtmax(3);qtmax(4);qtmax(5);qtmax(6);qtmax(7);
qtmax(8);qtmax(9);qtmax(10);qtmax(21);qtmax(23);qtmax(25);qtmax(27);
qtmax(29);qtmax(31);qtmax(33);qtmax(35);qtmax(39);
qtmax(41);qtmax(43)];
qmaxEd=[qtmax(118);qtmax(120);qtmax(122);qtmax(124);qtmax(126);
qtmax(128);qtmax(130);qtmax(134);qtmax(136);qtmax(138);
qtmax(140)];
%-----FUERZAS MÁXIMAS EN ESTRIBOS-----
FmaxEi=[Qtmax(1);Qtmax(2);Qtmax(3);Qtmax(4);Qtmax(5);Qtmax(6);Qtmax(7);
Qtmax(8);Qtmax(9);Qtmax(10);Qtmax(21);Qtmax(23);Qtmax(25);Qtmax(27);
Qtmax(29);Qtmax(31);Qtmax(33);Qtmax(35);Qtmax(39);
Qtmax(41);Qtmax(43)];
FmaxEd=[Qtmax(118);Qtmax(120);Qtmax(122);Qtmax(124);Qtmax(126);

```

```

Qtmax(128);Qtmax(130);Qtmax(134);Qtmax(136);Qtmax(138);
Qtmax(140)];
%-----DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS EN APOYOS-----
for i=1:12; Z(i)=4.91*i; end
qmaxC1=[qtmax(45);qtmax(46);qtmax(47);qtmax(48);qtmax(49);qtmax(50);qtmax(51);
qtmax(52);qtmax(53);qtmax(54);qtmax(55);qtmax(56)];
qmaxC2=[qtmax(81);qtmax(82);qtmax(83);qtmax(84);qtmax(85);qtmax(86);qtmax(87);
qtmax(88);qtmax(89);qtmax(90);qtmax(91);qtmax(92)];
%-----FUERZAS MÁXIMOS EN APOYOS-----
FmaxC1=[Qtmax(45);Qtmax(46);Qtmax(47);Qtmax(48);Qtmax(49);Qtmax(50);Qtmax(51);
Qtmax(52);Qtmax(53);Qtmax(54);Qtmax(55);Qtmax(56)];
FmaxC2=[Qtmax(81);Qtmax(82);Qtmax(83);Qtmax(84);Qtmax(85);Qtmax(86);Qtmax(87);
Qtmax(88);Qtmax(89);Qtmax(90);Qtmax(91);Qtmax(92)];
%-----
save TOT
% Figuras
figure(1) %Desplazamientos Estribo izquierdo
subplot(221);plot(tu',qt(10,:));title('GDL 10');
subplot(222);plot(tu',qt(37,:));title('GDL 37');
subplot(223);plot(tu',qt(141,:));title('GDL 141');
subplot(224);plot(tu',qt(147,:));title('GDL 147');
figure(2) %Desplazamientos Apoyo Central 1
subplot(221);plot(tu',qt(52,:));title('GDL 52');
subplot(222);plot(tu',qt(53,:));title('GDL 53');
subplot(223);plot(tu',qt(55,:));title('GDL 55');
subplot(224);plot(tu',qt(56,:));title('GDL 56');
figure(3) %Desplazamientos Estribo Derecho
subplot(221);plot(tu',qt(118,:));title('GDL 118');
subplot(222);plot(tu',qt(132,:));title('GDL 132');
subplot(223);plot(tu',qt(158,:));title('GDL 158');
subplot(224);plot(tu',qt(164,:));title('GDL 164');
figure(4) %Fuerzas de Corte Estribo izquierdo
subplot(221);plot(tu',Qt(10,:));title('GDL 10');
subplot(222);plot(tu',Qt(37,:));title('GDL 37');
subplot(223);plot(tu',Qt(141,:));title('GDL 141');
subplot(224);plot(tu',Qt(147,:));title('GDL 147');
figure(5) %Fuerzas de Corte Apoyo Central
subplot(221);plot(tu',Qt(52,:));title('GDL 52');
subplot(222);plot(tu',Qt(53,:));title('GDL 53');
subplot(223);plot(tu',Qt(55,:));title('GDL 55');
subplot(224);plot(tu',Qt(56,:));title('GDL 56');
figure(6) %Fuerzas de Corte Estribo dERECHO
subplot(221);plot(tu',Qt(118,:));title('GDL 118');
subplot(222);plot(tu',Qt(132,:));title('GDL 132');
subplot(223);plot(tu',Qt(158,:));title('GDL 158');
subplot(224);plot(tu',Qt(164,:));title('GDL 164');
figure(7) % Maximos en Estribos
subplot(221);plot(qmaxEi',HI);title('Desplazamientos Estribo I. ');
subplot(222);plot(FmaxEi',HI);title('Fuerzas Estribo I. ');
subplot(223);plot(qmaxEd',HD);title('Desplazamientos Estribo D. ');
subplot(224);plot(FmaxEd',HD);title('Fuerzas Estribo D. ');
figure(8) % Maximos en Apoyos Centrales
subplot(221);plot(qmaxC1',Z);title('Desplazamientos Apoyol. ');
subplot(222);plot(FmaxC1',Z);title('Fuerzas Apoyo I. ');
subplot(223);plot(qmaxC2',Z);title('Desplazamientos Apoyo D. ');
subplot(224);plot(FmaxC2',Z);title('Fuerzas Apoyo D. ');

% ---end---

```

UTILIZACIÓN DE HONGOS MICORRÍFICO-ARBUSCULARES EN PLÁNTULAS DE TOMATE DE ÁRBOL (*SOLANUM BETACEUM*) CULTIVADAS *IN VITRO*: EFECTOS DURANTE LA FASE DE ACLIMATACIÓN

Espín, E., Medina, M.E., Jadán, M. & Proaño, K.

Carrera de Ingeniería en Biotecnología
Escuela Politécnica del Ejército

RESUMEN

El tomate de árbol es una especie de interés agrícola en el país, que ha demandado en los últimos años el desarrollo de nuevas técnicas de propagación. El cultivo *in vitro* de tejidos vegetales constituye una alternativa para la propagación del tomate de árbol, ya que ofrece una producción permanente de plantas de calidad y libres de patógenos. Sin embargo, durante la fase de aclimatación se presenta un alto porcentaje de pérdida de las plantas, por su incapacidad de adaptarse a las condiciones ambientales. En este sentido los hongos micorrízico-arbusculares (HMA), contribuyen a mejorar el crecimiento y tolerancia de estas plantas, disminuyendo las pérdidas durante la fase de aclimatación.

En el presente trabajo se aplicó un aislado nativo de HMA en plántulas de tomate de árbol cultivadas *in vitro*, en dos tipos de sustratos: Suelo+Turba y Suelo+Germinaza. Además, se estandarizó un método de germinación *in vitro* de semillas de tomate de árbol, en el que se evaluaron: diferentes medios de cultivo (M&S, M&S con 2mg.L⁻¹ de BAP y M&S con 1,5 mg.L⁻¹ de GA₃), tipos de semilla (certificadas y de fruto) y tratamientos pre-germinativos (escarificación mecánica y escarificación mecánica con imbibición). El método más efectivo en la estandarización de la germinación *in vitro* de semillas de tomate de árbol, fue el tratamiento que consistió en semillas de fruto, escarificación mecánica e imbibición y medio M&S con 2mg.L⁻¹ de BAP.

Después de tres meses del proceso de micorrización durante la fase de aclimatación, las plantas fueron evaluadas en: porcentaje de supervivencia, altura, biomasa aérea, peso radical, índice plastocrónico (desarrollo), número de hojas nuevas, área foliar, contenido de agua y de fósforo. Los tratamientos micorrizados fueron significativamente superiores a los no micorrizados. Adicionalmente, se determinó la capacidad infectiva del aislado nativo de HMA, cuyos porcentajes de colonización micorrízica fueron altos pese al alto contenido nutritivo y de fósforo de los sustratos. La mejor colonización micorrízica se obtuvo con el sustrato Suelo+Turba contribuyendo a un mayor crecimiento de las plantas.

Esta investigación demuestra que los HMA contribuyen de manera positiva a la estabilización, desarrollo y crecimiento de las plantas de tomate de árbol durante la fase de aclimatación.

ABSTRACT

The tree tomato (Tamarillo) crop is important in Ecuador. In recent years, it has required the development of new techniques for propagation of this species. The *in vitro* culture of plant tissue is an alternative to produce tree tomato, as it provides a permanent production of pathogen free, quality plants. However, during the acclimatization phase a high number of plants die, because of their inability to adapt to environmental conditions. It has been reported, that arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), improve plant growth and tolerance, during the acclimatization phase.

In the present study, we applied a native isolated of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) to tree tomato seedlings *in vitro* cultured. The investigation assessed the efficiency of two

substrates, Soil+Peat and Soil+Germinaza. In addition, the study included the standardization of an *in vitro* germination method for tree tomato seeds, we evaluated the treatments: culture medium (M&S, M&S with 2mg.L⁻¹ BAP and M&S with 1,5 mg.L⁻¹ of GA₃), seed type (fruit seeds and certified seeds) and pre-germinative treatment (mechanical scarification and imbibition plus mechanical scarification). The most effective method for the *in vitro* germination of tree tomato seeds, consisted in fruit seeds, mechanical scarification plus imbibition and M&S with 2mg.L⁻¹ BAP medium.

The trial in the acclimatization phase was maintained for three months and at the end of it, the plants were evaluated by survival rate, length, biomass, root weight, plastochron index, number of new leaves, leaf area, water and phosphorus content. According to the results, treatments with mycorrhizae showed higher growth and development, than non mycorrhizae treatments. Additionally, we determined the infectivity of the AMF native isolated, it showed high mycorrhizal colonization rates despite the elevated nutrient and phosphorus content of substrates. Regarding the substrate, Soil+Peat promoted the mycorrhizal colonization and plant growth more than Soil+Germinaza.

The investigation determined that AMF contributes positively to the stabilization, development and growth of tree tomato plants during the acclimatization phase.

1. INTRODUCCIÓN

La importancia económica del cultivo de tomate de árbol y las grandes expectativas de exportación actuales generan la necesidad de potenciar técnicas ecológicas de mejoramiento y producción masiva del fruto, que permitan cumplir con los estándares de calidad y sanidad exigidos por el mercado internacional (SICA, 2007).

El cultivo *in vitro* de tejidos vegetales se perfila como una herramienta biotecnológica eficiente, que contribuirá a la producción a gran escala de tomate de árbol en el país. Sin embargo, esta técnica necesita superar las limitaciones que se presentan en la fase de aclimatación de las plántulas mediante la aplicación de microorganismos beneficiosos que forman parte de la microbiota habitual del suelo (Roveda *et al.*, 2007), y que normalmente son eliminados en estos sistemas de propagación por el uso de sustratos estériles (Vidal *et al.*, 1992; Pedraza *et al.*, 2001).

El uso de hongos micorrízico-arbusculares (HMA) durante la fase de aclimatación de plantas micropropagadas, ha despertado un gran interés en los últimos años, debido a los resultados beneficiosos que se han reportado en varias investigaciones en frutales incluido el tomate de árbol (Osorio *et al.*, 2006). Las ventajas inherentes a la simbiosis les permiten a las plantas micorrizadas sobrevivir a la etapa de endurecimiento y adaptarse mejor en campo (Vega, 1999; Alarcón *et al.*, 2000).

Los estudios realizados señalan que las plantas cultivadas *in vitro* micorrizadas enfrentan mejor la fase de aclimatación (Vega, 1999). La simbiosis mejora en las plantas la captación y asimilación de nutrientes de baja movilidad como el fósforo. Adicionalmente reduce los efectos del estrés hídrico a causa de la raíz poco desarrollada y mejora el funcionamiento fotosintético y estomático. Los HMA establecen en la planta un sistema de defensa frente a patógenos, incrementan el crecimiento foliar y radicular (Thacker & Jasrai, 2002) e inducen la producción de hormonas en la planta (Alarcón & Ferrera-Cerrato 1999; Pedraza *et al.*, 2001).

Este trabajo propone establecer una técnica que implemente el uso de los hongos micorrízico-arbusculares para incrementar el desarrollo, adaptabilidad y supervivencia de las plantas de tomate de árbol, durante la fase de aclimatación. Esta tecnología contribuirá a minimizar las pérdidas posteriores al cultivo *in vitro* de tomate de árbol y a ofrecer plantas de calidad con el valor agregado de una mayor capacidad adaptativa en campo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Material vegetal y microbiológico

Las semillas se recolectaron en la provincia de Imbabura, Cantón Pimampiro, a partir de árboles de tomate de árbol de la variedad amarilla. Las esporas nativas de HMA, se aislaron de suelos utilizados en cultivo de tomate de árbol, en el mismo Cantón, mediante la técnica de procesamiento de suelo descrita por Gerdeman y Nicholson en 1963, modificada por Herrera *et al.*, 2004.

2.2 Cultivo in vitro de semillas de tomate de árbol

Para la germinación *in vitro* de semillas de tomate de árbol, se evaluaron los factores: medio de cultivo (M&S, M&S con 2mg.L⁻¹ de BAP y M&S con 1,5 mg.L⁻¹ de GA₃), tipo de semilla (certificadas y de fruto) y tratamiento pre-germinativo (escarificación mecánica y escarificación mecánica con imbibición). Las semillas se desinfectaron con cloro al 1,5% por 5 minutos y alcohol al 70% durante 2 minutos. La escarificación se realizó con un ligero corte con bisturí en la testa de la semilla. Los frascos con las semillas se mantuvieron a 25±3°C de temperatura, 65% de humedad relativa, 14 horas luz y ≈ 2000 luxes, durante 1 mes. Finalmente se sembraron 400 semillas con el método estandarizado, que consiste en: en semillas de fruto, escarificación mecánica e imbibición y medio M&S.

2.3 Aplicación de HMA durante la fase de aclimatación de plántulas de tomate de árbol (*Solanum betaceum*)

Cuando las plantas presentaron dos hojas verdaderas y una altura de 7 cm, se trasplantaron a los sustratos: Suelo+Turba y Suelo+Germinaza, previamente esterilizados en autoclave a 121°C, 15 lb de presión, durante 2 horas. Se añadieron directamente 20 esporas a las raíces de las plántulas con ayuda de una micropipeta. Después de 3 meses (al finalizar la fase aclimatación), las plantas fueron evaluadas en: porcentaje de supervivencia, altura, biomasa aérea, peso radical, índice plastocrónico (o desarrollo), número de hojas nuevas, área foliar, contenido de agua y de fósforo. Además se determinó el porcentaje de colonización radical mediante la técnica de tinción de raíces de Phillips & Hayman, 1970.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La estandarización del método para la germinación de semillas, mostró diferencias significativas entre los tratamientos. El medio de cultivo más efectivo fue el M&S con 2mg.L⁻¹ de BAP, posiblemente debido a que este bioregulador promueve el crecimiento celular en los cotiledones y elimina la latencia de las semillas (Fig. 1). Sin embargo, estas semillas desarrollaron callos y un desarrollo morfológico anormal, probablemente porque la presencia de BAP en el medio indujo el crecimiento celular formando callos e inhibió el crecimiento apical del tallo principal, generando el crecimiento de los brotes laterales (Vega y Prehn, 2005).

En cuanto al tipo de semilla, las semillas certificadas mostraron muy bajos niveles de germinación. Posiblemente porque éstas entran en latencia como respuesta adaptativa a los tratamientos previos a los que se someten (Koorneef *et al.*, 2002). La escarificación mecánica combinada con la imbibición fue efectiva ya que el corte rompe la barrera mecánica que representa la testa y permite la hidratación de la semilla durante la imbibición, esto induce la salida de la radícula y da paso a la germinación (Manz *et al.*, 2005).

Los hongos micorrízico arbusculares, contribuyeron a mejorar el estado fisiológico y crecimiento de las plantas de tomate de árbol durante la fase de aclimatación, como se observa en la Tabla 1, las variables evaluadas son significativamente mayores en las plantas micorrizadas, que en las no micorrizadas.

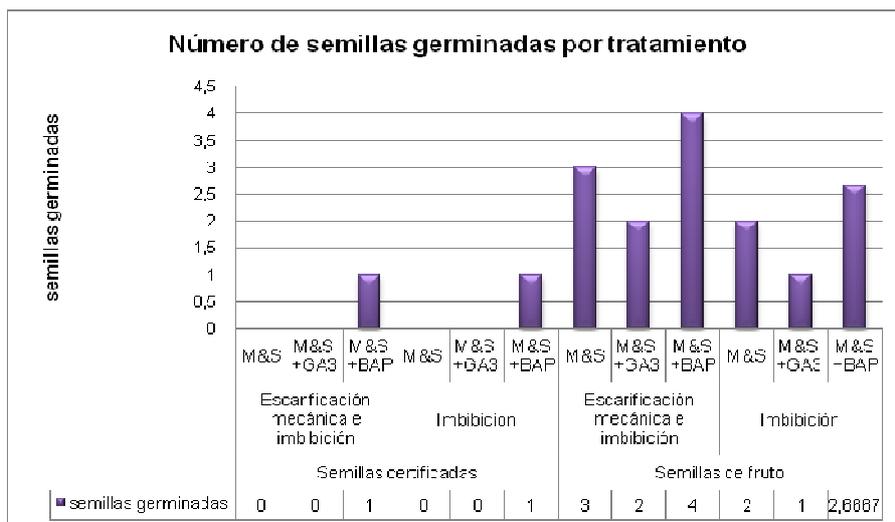


Figura 1. Número de semillas germinadas en cada tratamiento del ensayo de germinación *in vitro* de semillas de tomate de árbol (*Solanum betaceum*), a las 3 semanas de siembra.

El establecimiento de la simbiosis, incrementó la altura, biomasa, número de hojas nuevas y desarrollo de la planta, probablemente debido a que permite una mayor absorción y asimilación de nutrientes, estimulando también la producción de fitohormonas. Adicionalmente mejora la actividad fotosintética, que es deficiente en las plantas que provienen de cultivo *in vitro*, por el hábito heterotrófico que éstas adquieren en el medio de cultivo (Read, 1998).

La contribución de las micorrizas para mejorar el desarrollo radical es importante, ya que las plantas provenientes de cultivo *in vitro*, tienen un sistema radical débil. En el ensayo se observó un mayor peso radicular en las plantas micorrizadas, esto se debe a que los HMA incrementan la ramificación de la raíz, reducen el tamaño de las raíces adventicias y aumentan el número de éstas en la planta. Estas modificaciones generan una raíz más densa y eficiente por la presencia del micelio externo que penetra los poros del suelo que son inaccesibles para la raíz. (Vega, 1991, Pedraza *et al.*, 2001).

Se observó que las plantas micorrizadas presentan algunas ventajas en cuanto a la absorción de agua, debido a que los hongos mejoran la conexión vascular entre tallo y raíz, la agregación del suelo, la actividad estomática y la acción del ácido abscísico, para evitar la deshidratación de las plantas (Augé, 2004). El contenido de fósforo no fue significativamente mayor en las plantas micorrizadas, posiblemente porque los sustratos tenían un alto contenido de fósforo. Los HMA, mediante su micelio incrementan la absorción de fósforo cuando éste no está disponible para las plantas. En este caso el elemento estaba disponible para las plantas micorrizadas y no micorrizadas, por lo que no se observó esta contribución (Grace *et al.*, 2009).

Se evidencia además en la Tabla 1, que el sustrato Suelo+Turba, favorece tanto el crecimiento de la planta como la colonización micorrícica, potenciando la acción del hongo en variables como número de hojas nuevas, peso fresco de la biomasa aérea, peso radical y área foliar.

Finalmente, el inóculo aislado mostró una gran capacidad infectiva, lo que demuestra el éxito del uso de microorganismos nativos del suelo, que desarrollan ventajas adaptativas y de compatibilidad con las plantas.

Tabla 1. Variables de crecimiento y desarrollo de las plantas de tomate de árbol, durante la fase de aclimatación, de acuerdo a los tratamientos (con y sin micorrizas, en los diferentes sustratos).

Variable en planta	Suelo+Turba		Suelo+Germinaza	
	Micorrizas	Control	Micorrizas	Control
Altura(cm)	35.67 a	24.31 c	30.39 b	19.06 d
Índice plastocrónico	8.66 a	6.24 b	7.76 a	5.42 b
Área foliar (cm ²)	214.44 a	86.67 c	133.11 b	63.78 c
Biomasa aérea (peso fresco g)	28.20 a	16.76 c	19.17 b	5.63 d
Biomasa aérea (peso seco g)	2.65 a	1.62 b	1.83 b	1.05 c
Número de hojas nuevas	4.67 a	4 a	4.61 a	2.61 b
Peso radical (g)	25.54 a	9.8 c	17.09 b	8.98 c
Contenido de agua (%)	90.62 a	89.89 b	90.44 a	89.24 b
Contenido de fósforo (%)	0.44 a	0.38 a	0.43 a	0.37 a
Porcentaje de colonización (%)	52.78 a	0 c	37.78 b	0 c

4. CONCLUSIONES

La técnica estandarizada para la germinación *in vitro* de semillas de tomate de árbol (*Solanum betaceum*), que consistió en: medio básico de Murashige y Skoog, semillas provenientes de fruto y escarificación mecánica e imbibición como tratamientos pre-germinativos; promovió la germinación *in vitro* de las semillas y permitió obtener plantas viables y resistentes.

Por otro lado, las especies nativas de hongos micorrízico-arbusculares aisladas de suelos con cultivos de tomate de árbol, de la provincia de Imbabura, mostraron una gran capacidad infectiva y tolerancia a altas concentraciones de fósforo, nitrógeno y materia orgánica.

Los hongos micorrízico arbusculares contribuyeron a mejorar la adaptabilidad, crecimiento y desarrollo de las plantas de tomate de árbol, durante la fase de aclimatación. El sustrato Suelo+Turba favoreció la colonización micorrízica y el crecimiento de las plantas de tomate de árbol durante la fase de aclimatación.

El uso de hongos micorrízico-arbusculares, para la aclimatación de plantas cultivadas *in vitro*, constituye una potencial herramienta biotecnológica natural, de bajo costo, que permitirá minimizar las pérdidas en la producción de plantas a gran escala, ya que mejoran el crecimiento y desarrollo de la planta permitiéndole enfrentar de mejor manera la fase de aclimatación.

REFERENCIAS

1. Alarcón, A. y Ferrera-Cerrato R. (1999). Manejo de la Micorriza Arbuscular en sistemas de propagación de plantas frutícolas. *TERRA Latinoamericana*. 17:179-191.
2. Alarcón, A., Ferrera-Cerrato R., González Chávez M.C., Villegas A. (2000). Hongos Micorrízico Arbusculares en las dinámicas de aparición de estolones y nutrición de plantas de fresa CV FERN., obtenidas por cultivo *in vitro*. *TERRA Latinoamericana*. 18:211-218.
3. Augé, R. (2004). Arbuscular mycorrhizae and soil/plant water relations. *Canadian Journal of Soil Science*. 373-381.
4. Grace, E., Smith, A. & Smith, S. (2009). Deciphering the Arbuscular Mycorrhizal Pathway of P Uptake in Non-responsive Plant Species. In C. Azcón-Aguilar, J. Barea, S. Gianinazzi, V. & Gianinazzi-Pearson (Eds) *Mycorrhizas Functional Process and Ecological Impact*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Alemania. 89-106.

5. Koorneef, M., Bentsink, L. & Hilhorst, H. (2002). Seed dormancy and germination. *Plant Biology. Growth and Development*. 5:33-36
6. Manz, B., Müller, K., Kucera, B., Volke, F. & Leubner-Metzger, G. (2005). Water Uptake and Distribution in Germinating Tobacco Seeds Investigated in Vivo by Nuclear Magnetic Resonance Imaging. *Plant Physiology*. 138:1538–1551.
7. Osorio, W., González, O., Corredor, A. y Montoya, B. (2006). Dependencia Micorrizal de Frutales de Clima Frío. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. Facultad de Ciencias. Escuela de Geociencia.
8. Pedraza-Santos, M., Jaen-Contreras, D., Gutiérrez-Espinosa, A. Colinas-León, T. y López-Peralta, C. (2001). Crecimiento y nutrición de microplantas de Gerbera inoculadas con hongos micorrízicos arbusculares. *Agrociencia*. 35: 149-158.
9. Phillips, J & Hayman D. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 55: 158-161.
10. Read, D. (1998). The state of the art. In A. Varma & B. Hock (Eds), *Mycorrhiza, Structure, Function, Molecular Biology and Biotechnology*. Segunda Edición. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. 3-36.
11. Roveda, G., Cabra L., Ramírez, M. y Peñaranda, A. (2007). Efecto de las micorrizas arbusculares sobre la aclimatación y endurecimiento de microplántulas de mora (*Rubus glaucus*). *Revista Corpoica – Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 1:28-36
12. Servicio de Información y Censo Agropecuario. Ministerio de Agricultura del Ecuador, SICA. Extraído el 2 de noviembre, 2008, del sitio web del Ministerio de Agricultura:<http://www.sica.gov.ec/agronegocios/productos%20para%20invertir/frutas/ tomate%20arbol/general.html>.
13. Thacker, M. & Jasrai, Y. (2002). Increased Growth of Micropropagated Banana (*Musa paradisiaca*) with VAM Symbiont. *Plant Tissue Cult.* 2:147-154.
14. Vega M. C. Jaizme (1999). Aplicaciones de las Micorrizas Arbusculares (MA) sobre plataneras micropropagadas. Memorias del taller internacional sobre producción de banano orgánico y, o, ambientalmente amigable.
15. Vega, A. y Prehn D. (2005). Inducción e Inicio de Maduración In vitro de Tejido Embriogénico de Quillaja saponaria. *Ciencia e Investigación agraria*. 198-208
16. Vidal, M.; Azcón-Aguilar, C. & Barea, J. (1992). Mycorrhizal Inoculation Enhances Growth and Development of Micropropagated Plants of Avocado. *HortScience* 7:785-787.

EVALUACIÓN DE LA ACTIVIDAD DEL FORMONONETÍN, ÁCIDO 3-INDOL BUTÍRICO Y TIAMINA PARA PROMOVER LA GERMINACIÓN *IN VITRO* DE ESPORAS DE HONGOS MICORRÍFICO-ARBUSCULARES (HMA)

Baroja I., Medina M. E. & Proaño K.

Departamento de Ciencias de la Vida
Ingeniería en Biotecnología
Escuela Politécnica del Ejército

RESUMEN

En la actualidad, la exigencia de los mercados internacionales para la comercialización de productos agrícolas sin químicos, ha promovido el interés en la fabricación de tecnologías que permitan la generación de herramientas biotecnológicas sustentables. En este contexto, los hongos micorrízico arbusculares (HMA) han sido probados a manera de biofertilizante con gran éxito.

Estos microorganismos que forman parte de la microbiota común del suelo, influyen en el incremento del desarrollo de los cultivos. Además, facilitan la recuperación de suelos erosionados y la estabilización de espacios contaminados. La presente investigación tuvo como objeto, el estudio de la actividad de los exudados radicales: formononetín (7-hidroxi, 4'-metoxi isoflavona), tiamina y ácido 3-indol butírico en la germinación de esporas de HMA para promover la micorrización de plantas de avena, maíz y soya y de esta manera mejorar las características de los inóculos comerciales ya existentes.

Los resultados obtenidos en este trabajo mostraron que inocular las plantas con HMA pre-germinados, acelera el proceso de simbiosis. La micorrización incrementó considerablemente el desarrollo vegetal en relación con los controles (plantas sin HMA). Adicionalmente, se pudo observar que los niveles de producción de esporas varían dependiendo de la especie vegetal, siendo avena y soya los hospederos que mayor población de HMA presentaron al final de esta investigación, lo que permite sugerirlas como plantas útiles para la generación de inóculo micorrízico a gran escala.

ABSTRACT

Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) are microorganisms constituting the common soil microflora, whose role includes the increase of crop yield and recovery and stabilization of contaminated soils or eroded. Currently, the requirement of international markets for the marketing of agricultural products which form of culture does not involve the application of chemicals, has encouraged interest in making new technologies that allow the generation of biotechnological tools and friendly sustainable environment and in this context the AMF play a key role.

For the use of biofertilizer HMA way, it is necessary to study all the parameters needed to promote their best performance on the ground. In this sense, this research aimed to study the activity of root exudates: formononetin (7-hidroxi, 4'-metoxi isoflavona), thiamine and 3-indolebutyric acid on the germination of AMF spores and induction of mycorrhizal plants of corn, soybeans and oats, to thus increase the functionality of commercial inocula and identify suitable plant species for the multiplication of AMF spores in the beds of fertilizer production.

The results from this study demonstrate that the formononetin and thiamine produced a positive effect on the germination of AMF spores *in vitro*. Also, it was proved that the inoculated plants (corn, soybeans and oats) AMF spores pre-germinated, the symbiosis process

accelerates, the greater the effect mainly on the biomass plants treated with AMF spores without pre-germination. In all cases controls (plants without AMF) had the lowest range of growth. It was also noted that production levels of AMF spores, depends on the host and in this sense soybeans and oats are plants where sporulation rates are extremely high, which may suggest as useful plants for the generation of mycorrhizal inoculum on big scale.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, se están implementando nuevas formas de cultivo que reemplazan el uso de pesticidas con herramientas biotecnológicas que permiten un incremento en la productividad, manteniendo el equilibrio biológico del suelo. Es así, que el uso de hongos formadores de micorriza arbuscular (HMA) ha cobrado gran importancia en la agricultura mundial en los últimos años (Román, 2003).

Los HMA forman parte de la microbiota común del suelo y juegan un papel fundamental en el desarrollo y adaptación (fitness) de las plantas. Cuando la simbiosis entre el hongo micorrícico y la planta se establece, el microorganismo se vuelve parte integral de su hospedero, asegurando el crecimiento de éste bajo distintas condiciones ambientales.

Es así que, un amplio rango de plantas con interés agronómico dependen de las micorrizas para su desarrollo, sobre todo cuando se encuentran sembradas en suelos con problemas de productividad, ya que los HMA incrementan la resistencia natural de las plantas frente a desequilibrios bióticos (patógenos) y abióticos (estrés hídrico, salino o contaminantes) (Atkinson, 2009). Por ello, países como España, Cuba, Brasil, Colombia y Chile están trabajando en la generación de biofertilizantes elaborados en base a HMA.

Estos biofertilizantes consisten en sustratos (suelo, turba, vermiculita, arena, entre otros) donde se encuentran suspendidas esporas de HMA en concentraciones identificadas (100-4000 esporas por gramo) y ocasionalmente compactadas en medios polimerizantes (alginato de sodio). Este tipo de técnicas han resultado innovadoras y fácilmente aplicables, sin embargo presentan dos graves limitantes: la actividad del inóculo comercial y el tipo de cultivo en donde el biofertilizante puede ser aplicado.

En cuanto a la actividad, el problema consiste en que los HMA al ser almacenados, ingresan en un período de latencia característico de las estructuras fúngicas. Este estadio se desencadena debido a que los HMA al ser simbioses estrictos requieren de la presencia de un hospedero vegetal para mantenerse activos. Una vez que las esporas entran en latencia, pueden permanecer así desde varios días, meses e incluso hasta su senescencia y muerte (Siqueira, 1983). Por lo tanto, cuando los biofertilizantes no se usan inmediatamente, disminuyen su efectividad, factor que representa pérdida de tiempo y dinero para el agricultor.

En lo referente al tipo de cultivo, se sabe que los HMA han sido empleados con altos rendimientos principalmente en frutales y algunas hortalizas mientras que en sembríos de "ciclo corto" como cereales, la efectividad de la micorriza disminuye puesto que el tiempo que los HMA tardan en realizar la simbiosis espontáneamente es similar al tiempo que la planta permanece en el suelo antes de su cosecha. En ese sentido, el empleo de HMA como biofertilizantes para cultivos de cosecha temprana resulta poco efectivo, eliminándose por ello un amplio sector de consumidores de esta tecnología.

Una manera útil de resolver las dificultades antes mencionadas es identificar mecanismos que fomenten la actividad de las esporas, para de esta manera impedir que estas entren en latencia y así reducir el tiempo que necesitan para realizar la simbiosis. En ese sentido, se conoce que la actividad de las esporas está aparentemente ligada a la extensión de su tubo germinal, por lo tanto, identificar las sustancias que estimulan la producción de micelio en los HMA resultaría una herramienta clave para potenciar el efecto de los biofertilizantes en campo.

Se han realizado investigaciones que demuestran que flavonoides como el formononetín (Baptista & Siqueira, 1994), auxinas como el ácido 3-indol butírico (Kerstin *et al.*, 2007), vitaminas como la tiamina (Siqueira & Hubbell, 1982), entre otros muchos exudados, inducen la germinación esporas. Identificar las dosis en las que estos compuestos (tiamina, formononetín y ácido 3-indol butírico) inducen la germinación de los HMA genera grandes ventajas en la producción de inóculos comerciales donde estos hongos se encuentran presentes, ya que mediante estas sustancias se lograrían incrementos en competitividad y versatilidad. Adicionalmente, el estudio de estos exudados se convierte en una herramienta importante para la comprensión del ciclo simbiótico que actualmente presenta bastante ambigüedad.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En la presente investigación se realizaron dos ensayos, el primero consistió en inducir la germinación de esporas de HMA *in vitro* mediante el empleo de formononetín, tiamina y ácido 3-indol butírico en distintas concentraciones.

El segundo ensayo probó la funcionalidad de los exudados radicales (formononetín, tiamina y ácido 3-indol butírico) en contacto con esporas de HMA en presencia de distintos hospederos vegetales (soya, avena y maíz). Adicionalmente se comparó el potencial de micorrización de esporas pre-germinadas *in vitro* con respecto a esporas inoculadas sin germinación.

2.1 Material biológico

En el primer ensayo, se empleó un coctel de esporas de HMA aisladas siguiendo la técnica de Gerdemann & Nicholson (1963) del páramo de los llinizas. Se evaluaron tres zonas de intervención antropogénica distintas, para de esta manera encontrar esporas con una amplia funcionalidad (resistencia a agroquímicos y a estrés hídrico).

Para el segundo ensayo (macetas trampa) se emplearon tres tipos de tratamientos, uno sin esporas, otro con esporas pre-germinadas y finalmente uno con esporas sin germinar, para probar la efectividad de los HMA en el desarrollo vegetal y su actividad en presencia de reguladores de la elongación de tubo germinal.

Como hospederos vegetales se emplearon plantas de maíz (*Zea mays*), soya (*Glycine max*) y avena (*Avena sativa*).

2.2 Inductores de la germinación de esporas de HMA

Como se puede observar en la Tabla 1 se utilizaron análogos de exudados radicales distribuidos en un diseño de bloques completamente al azar (DBCA) en arreglo factorial de 4x4x3.

Tabla 1. Tratamientos establecidos para un factorial con cuatro niveles de formononetín, cuatro niveles de tiamina y tres niveles de ácido 3-indol butírico.

Tratamientos	Formononetín x tiamina x ácido 3-indol butírico										
	Formononetín (µM)				Tiamina (mg.L-1)				Ácido 3-indol butírico (mg.L-1)		
FnTnIBAn	F1	F2	F3	F4	T1	T2	T3	T4	IBA1	IBA2	IBA3
	0	1.5	2	2.5	0	0.01	0.1	1	0	1	1.5

n es el valor que pueden adquirir los factores en las distintas variables (4 niveles para formononetín y tiamina y 3 niveles para IBA), todos ellos interactuaron en el diseño.

3. RESULTADOS

Al aplicar formononetín y tiamina en los platos de cultivo se incrementa el rango de germinación de las esporas de HMA con respecto a la germinación espontánea. La Figura 1 muestra que el tratamiento que posee un mayor rendimiento es F4T4IBA1 (93,33%). En este tratamiento, se colocaron 2.5µM de formononetín, 1 mg.L⁻¹ de tiamina y 0 mg.L⁻¹ de IBA. Al finalizar el ensayo, el tratamiento control F1T1IBA1 alcanzó un rango de germinación de 20%, lo que demuestra que la presencia de flavonoides (formononetín) y vitaminas (tiamina) incrementa el índice de germinación de esporas de HMA y por tanto induce su actividad *in vitro*.

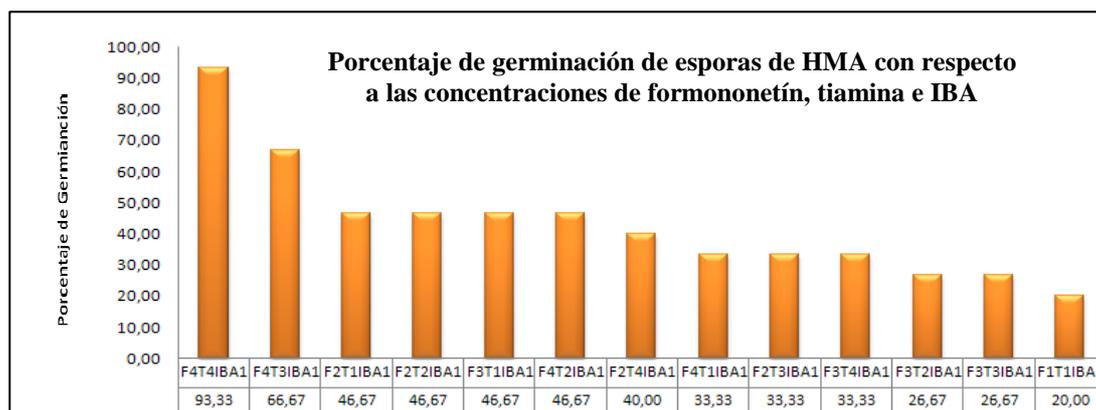
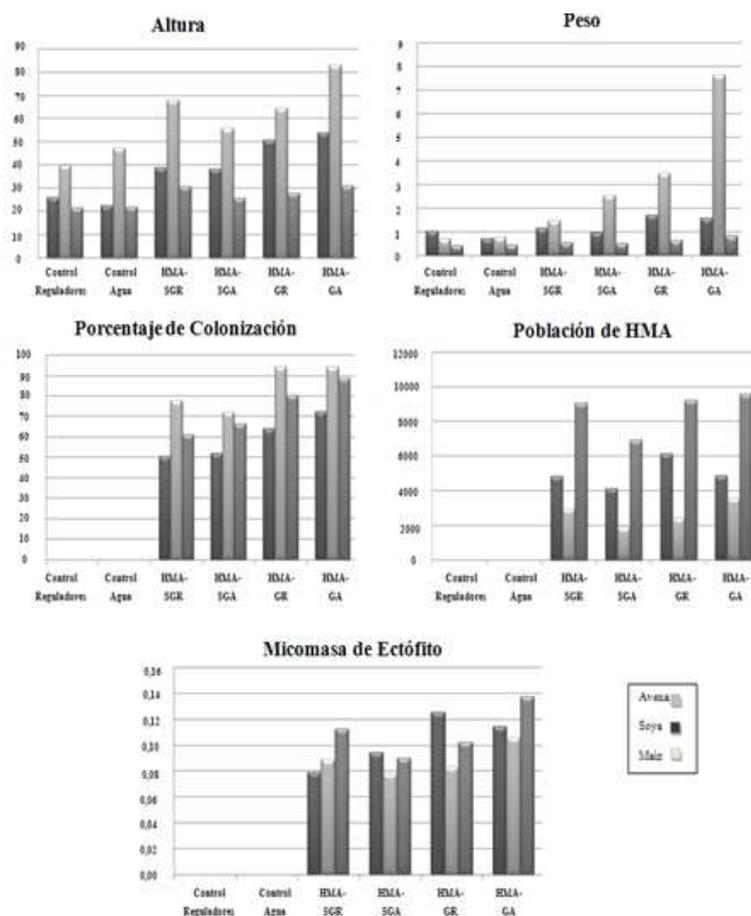


Figura 1. Porcentaje de germinación de esporas de HMA inducidas con formononetín, tiamina e IBA, con respecto al control tratado con agua.

Después de constatar que el tratamiento F4T4IBA1 posee la mayor influencia sobre las esporas de HMA en cajas Petri, se corroboró su efectividad en macetas trampa; es decir, en presencia de esporas y de hospederos vegetales (avena, maíz y soya).

Las plantas de avena, maíz y soya tratadas con hongos micorrízico arbusculares, mejoran su rendimiento con respecto a los controles (Fig. 2), observándose que para las variables de peso y altura en todas las plantas donde se establece la simbiosis, se incrementa la biomasa notoriamente. Además, se puede observar que las plantas inoculadas con esporas de HMA pre-germinadas alcanzan los más altos rendimientos, superando a la micorrización espontánea.

En cuanto al porcentaje de colonización se puede ver que la planta de mayor rendimiento es el maíz. Mientras que los índices más altos de esporulación y de producción de micomasa de ectófito están presentes en avena. Como se puede constatar en la Figura 2, los tres hospederos vegetales presentan una alta afinidad por el HMA permitiendo niveles de colonización intra-radical y esporulación sumamente altos (principalmente el cultivo de avena).



Control Reguladores: plantas tratadas sin HMA regadas con reguladores de la germinación de esporas. **Control Agua:** plantas tratadas sin HMA regadas con agua. **HMA-SGR:** hongos micorrícico arbusculares sin germinar regados con reguladores de la germinación. **HMA-SGA:** hongos micorrícico arbusculares sin germinar regados con agua. **HMA-GR:** hongos micorrícico arbusculares germinados regados con reguladores. **HMA-GA:** hongos micorrícico arbusculares germinados regados con agua.

Figura 2. Efecto de la utilización de esporas de HMA pre-germinadas y reguladores de la germinación de esporas de HMA en las variables: peso, altura, porcentaje de colonización, población total de HMA y micomasas de ectófito.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los hongos micorrícico-arbusculares juegan un papel sumamente importante en la actividad, productividad y estabilidad del suelo, siendo uno de los microorganismos de mayor versatilidad entre la microbiota.

Para que se establezca la simbiosis entre la planta y el HMA es necesario que se activen una serie de señales bioquímicas generalmente coordinadas por exudados extra-radicales y extra-fúngicos.

En el presente se trabajó, al utilizar isoflavonoides (formononetín) y vitaminas (tiamina) para inducir la germinación de esporas de HMA se lograron rendimientos comprendidos entre el 26,67 (F3T3IBA1 y F3T2IBA1) y el 93,33% (F4T4IBA1) mientras que las esporas a las que no se aplicaron estas sustancias (germinación espontánea) muestran un porcentaje de germinación cercano al 20%. Valores similares se han reportado en varias investigaciones realizadas por Pereira da Silva & Siqueira (1997); Akiyama, Matsuzaki & Hayashi.(2005); Barreto de Novais (2008), entre otros.

La utilización de esporas de HMA incrementa el vigor (biomasa) de las plantas de avena, soya y maíz (Pereira da Silva & Siqueira, 1997; Azcon Aguilar & Barea, 1982). Cuando se emplean esporas de HMA pre-germinadas se evidencia mayor producción de biomasa vegetal, siendo superior a la que presentan plantas inoculadas con HMA sin germinar.

Probablemente, el incremento del porcentaje de micorrización esta relacionado con las necesidades nutricionales que presente la planta y a la efectividad del inóculo de HMA utilizado (Nair *et al.*, 1991; Pereira da Silva & Siqueira, 1997; Siqueira & Hubbell, 1982; Kiriachek *et al.*, 2009). *Zea mays* fue la especie con mayor potencial de colonización por HMA (94%) posiblemente ya que esta planta requiere altas concentraciones de nutrientes para su desarrollo y en este sentido, los HMA incrementan su capacidad de absorción de vitaminas y minerales (Smith & Read, 1997; Pacios, 2005). A continuación se encuentran *Avena sativa* (88,33%) y *Glycine max* (72,33%), que también presentan índices de simbiosis altos, lo que es característico de pastos y granos (Pereira da Silva & Siqueira, 1997).

El hospedero que presentó mayor población de esporas por Kg de sustrato al culminar este ensayo fue *Avena sativa* con 9566,67 esporas por Kg de sustrato. Esto se ha visto en ensayos anteriores realizados con plantas de avena, trigo y cebada. Las mencionadas especies vegetales, son hospederos útiles para la producción de esporas de HMA debido a la alta provisión de nutrientes que entregan al micelio externo (Smith & Read, 1997). *Glycine max* posee una capacidad de producción de 6133,33 esporas por Kg de sustrato, seguida de *Zea mays* alcanza las 3533,33 esporas por Kg de sustrato. Estas dos plantas muestran un comportamiento eficiente para la generación de esporas, sin embargo, no llegan a ser tan productivas como *Avena sativa*, según los datos obtenidos por el presente ensayo.

REFERENCIAS

1. Akiyama K., Matsuzaki K. & Hayashi H. (2005). Plant sesquiterpenes induce hypha branching in arbuscular mycorrhizal fungi. *Nature* 435:824-827.
2. Atkinson D. (2009). Soil microbial resources and agricultural policies. *Mycorrhizas functional processes and ecological impact*. 1:1-15.
3. Baptista M. & Siqueira J. (1994). Efeito de flavonoides na germinação de esporos e no crescimento assimbiótico do fungo micorrízico arbuscular *Gigaspora gigantea*. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*. 6:127-134.
4. Barreto de Novais C. (2008). Colonização, esporulação e caracterização fenotípica e molecular de fungos micorrízicos arbusculares mantidos em cultura. Universidade Federal de Lavras.
5. Gerdemann, J. & Nicholson (1963). Spores of mycorrhizal endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Transnational British Mycological Society* 46:235-244.
6. Giovannetti M. & Mosse B. (1980). An evaluation of techniques for measuring vesicular-arbuscular mycorrhizal infection in roots. *New phytologist*. 84:489-500.
7. Herrera-Peraza R., Furrázola E., Ferrer R., Fernández R. & Torres Y. (2004). Functional strategies of root hairs and arbuscular mycorrhizae in an evergreen tropical forest, Sierra del Rosario-Cuba. *Revista CENIC Ciencias Biológicas*. 35:113-123
8. Kerstin J., Thiel D., Rehn F. & Ludwig-Müller J. (2007). Arbuscular mycorrhiza enhances auxin levels and alters auxin biosynthesis in *Tropaeolum majus* during early stages of colonization. *Physiologia plantarum*. 129:320-333.

9. Kiriachek G., Carvalho L., Pereira L., & Rodrigues M. (2009). Regulação do desenvolvimento de micorrizas arbusculares. Revista brasileira de ciencia del suelo. 33:1-16.
10. Nair M., Safir G. & Siqueira J. (1991). Isolation and identification of vesicular arbuscular mycorrhiza stimulatory compounds for clover (*Trifolium repens*) roots. Applied and Environmental Microbiology. 57:434-439.
11. Pereira da Silva J & Siqueira J. (1997). Aplicação de formononetina sintética ao solo como estimulante da formação de micorriza no milho e na soja. Universidade Federal de Lavras. Dep. Ciência do Solo. Embrapa-Centro de Pesquisa Agroflorestal da Amazônia Ocidental. Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal. 9:33-39.
12. Pereira da Silva J & Siqueira J. (1997). Colonização micorrícica e crescimento da soja com diferentes fungos e aplicação do isoflavonóide formononetina. Universidade Federal de Lavras. Dep. Ciência do Solo. Embrapa-Centro de Pesquisa Agroflorestal da Amazônia Ocidental.
13. Pacios C. (2005). La simbiosis entre *Lotus japonicus* y rizobio: función de la variación estructural del factor nod. Lotus Newsletter. 35:93-98.
14. Phillips J. & Hayman D. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. Transactions of the British Mycological Society 55:158-160.
15. Román F. (2003). Concentración de reguladores del desarrollo vegetal inducida por hongos endomicorrízicos en dos cultivares de chile (*Capsicum annum* L.). Universidad de Colima.
16. Siqueira J. & Hubbell D. (1982). Spore germination and germ tube growth of a vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus *in vitro*. The New York Botanical Garden 74:952-958.
17. Siqueira J. (1983). Nutritional and edaphic factors affecting spore germination, germ tube growth and root colonization by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. Gainesville, University of Florida.
18. Siqueira J., Safir G & Nair M. (1991). Significance of phenolic compounds in plant-soil-microbial systems. Critical Review Plant Science 10: 63-121.
19. Smith S. & Read D. (1997). Mycorrhizal symbiosis. Academic Press. San Diego.

