

Revista

CIENCIA

Sumario

Volumen 12, número 2, 2009

Magnitud Máxima En Zonas Fuentes Para Estudios De Peligrosidad Sísmica Del Ecuador	109
Roberto Aguiar Falconí y Celia Castro Torres	
Ley De Atenuación Para Estudios De Peligrosidad Sísmica Del Ecuador	122
Roberto Aguiar Falconí y Celia Castro Torres	
Estudio Comparativo De La Construcción En Acero Respecto Al Hormigón Armado En Sistemas Estructurales De Ocho Pisos	146
Christian Garzón Chalco y Wilman Yanchatuña	
Contaminación Por Mercurio De Aguas Y Sedimentos De Ríos Que Reciben Efluentes De La Minería De Oro En Los Sectores De Nambija, Ponce Enríquez Y Portovelo	166
Luis H. Cumbal F., Juan C. Duran L, Luis Albuja V.	
Diversidad Y Usos De Aves De Bosques Ribereños Remanentes En Fincas De Santo Domingo De Los Tsáchilas	180
Wilmer E. Pozo R y Andrés Eras M	
Conexiones De Hormigón Estructural Pila-Losa De Cubierta Bajo Cargas Laterales Cíclicas	204
P. Caiza, B. Andrawes , y J. LaFave.	

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

ISSN 1390-1117

© 2009 ESPE, Quito – Ecuador

ESPE, Quito – Ecuador

EDITOR**1 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.

A. Koch

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

M.E. Medina

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**Gabriela Cueva y Celia Castro**

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

ISSN 1390-1117

©2009 ESPE, Quito, Ecuador

MAGNITUD MÁXIMA EN ZONAS FUENTES PARA ESTUDIOS DE PELIGROSIDAD SÍSMICA DEL ECUADOR

Roberto Aguiar Falconí y Celia Castro Torres

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

RESUMEN

Se presentan las magnitudes máximas esperadas en cada una de las veinte zonas fuentes que se han considerado para posteriores estudios de peligrosidad sísmica del Ecuador. Las magnitudes máximas se han hallado teniendo en cuenta la máxima magnitud registrada instrumentalmente entre 1540 y 2009 y en base a una relación entre la longitud de ruptura y la magnitud.

Previamente, se obtuvo una relación entre la longitud de ruptura y la magnitud, trabajando con las curvas de intensidades sísmicas en la escala de Mercalli de 19 sismos que causaron demasiado daño en las estructuras, en el Ecuador. Esta relación se obtuvo con la hipótesis de que la longitud de la superficie de réplicas de un sismo, es la longitud de ruptura y es aproximadamente igual a la máxima longitud de la curva de la isosista de intensidad VIII. Se comprobó la validez de esta hipótesis con los sismos de Baeza 1987, Macas 1995 y Bahía de Caráquez 1998.

ABSTRACT

The maximum expected magnitudes in each of the twenty considered source areas are presented, for further study of seismic hazard of Ecuador. The maximum magnitudes were found taking into account the maximum instrumentally recorded magnitude between 1540 and 2009, based on a relationship between the rupture length and magnitude.

Previously, a relationship between the rupture length and magnitude was found, working with seismic intensity curves in 19 seisms Mercalli that have caused heavy damage to the structures, in Ecuador. This relationship was obtained with the assumption that the length of the surface replica of an earthquake, is the rupture length and is approximately equal to the maximum length of the isoseismal curve of intensity VIII. It was proved the validity of this hypothesis with the earthquakes of Baeza in 1987, Macas in 1995 and Bahía de Caráquez in 1998.

1. INTRODUCCIÓN

En base a la tectónica, geología y sismicidad registrada, se determinan las zonas fuentes, que son la base de los estudios de peligrosidad sísmica. Las zonas fuentes son volúmenes de litósfera en los cuales se producen sismos de las mismas fallas geológicas o de la misma zona de subducción. Para el Ecuador, Aguiar y Castro (2009) han definido 11 zonas fuentes asociados con el fallamiento local y 9 zonas fuentes asociadas a la subducción, las mismas que se presentan en las figuras 1 y 2.

En la figura 3 se presentan cuatro cortes en las latitudes 1° S, 2.5° S, 4° S y 6° S., que ayudan a comprender la forma de las zonas fuentes en el plano vertical. En ellas también se determina el espesor

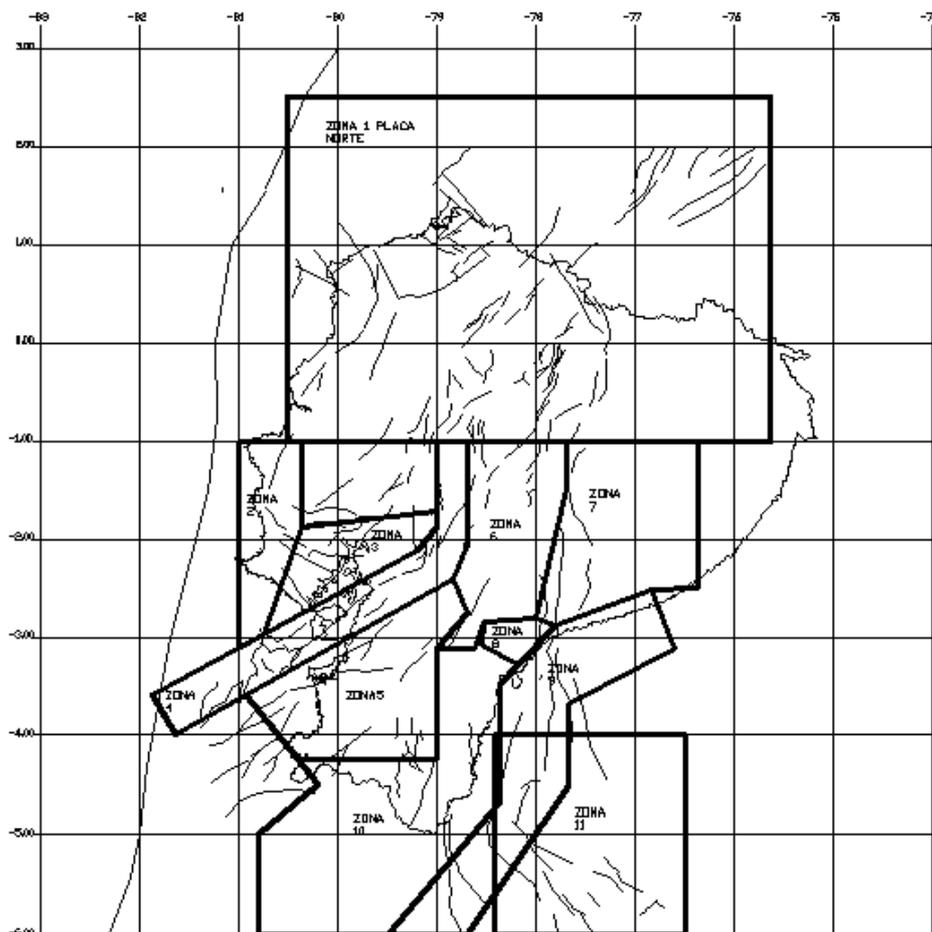


Figura 1 Zonas fuentes asociadas al fallamiento local.

Ahora bien, en cada zona fuente se debe encontrar la magnitud máxima que en ella se espera y la tasa anual de ocurrencia de sismos mayores o iguales a una determinada magnitud. En este artículo solo se obtiene la magnitud máxima esperada en cada zona sísmica.

2. MAGNITUD MÁXIMA

Existen diferentes fórmulas empíricas que relacionan la longitud de rotura de la falla L , con la magnitud máxima M_{max} . Una de las primeras relaciones fue propuesta por Idda (1959) para *fallas inversas*

$$M_{max} = 5.47 + 1.0 \log L \quad (1)$$

$$M_{max} = 6.04 + 0.79 \log L \quad (2)$$

La ecuación (1) es para sismos profundos y la ecuación (2) para sismos superficiales e intermedios. Por otra parte, Grases (1985), en base al estudio estadístico de 58 sismos ocurridos a nivel mundial y lo deducido con base en la geología para *fallas transcurrentes* se tiene:

$$M_{max} = 6.04 + 0.704 \log L \quad (3)$$

Donde la longitud de ruptura debe ser mayor a 35 km., y menor a 420 km. La máxima magnitud de los sismos empleados en el estudio fue $M_S = 8$.

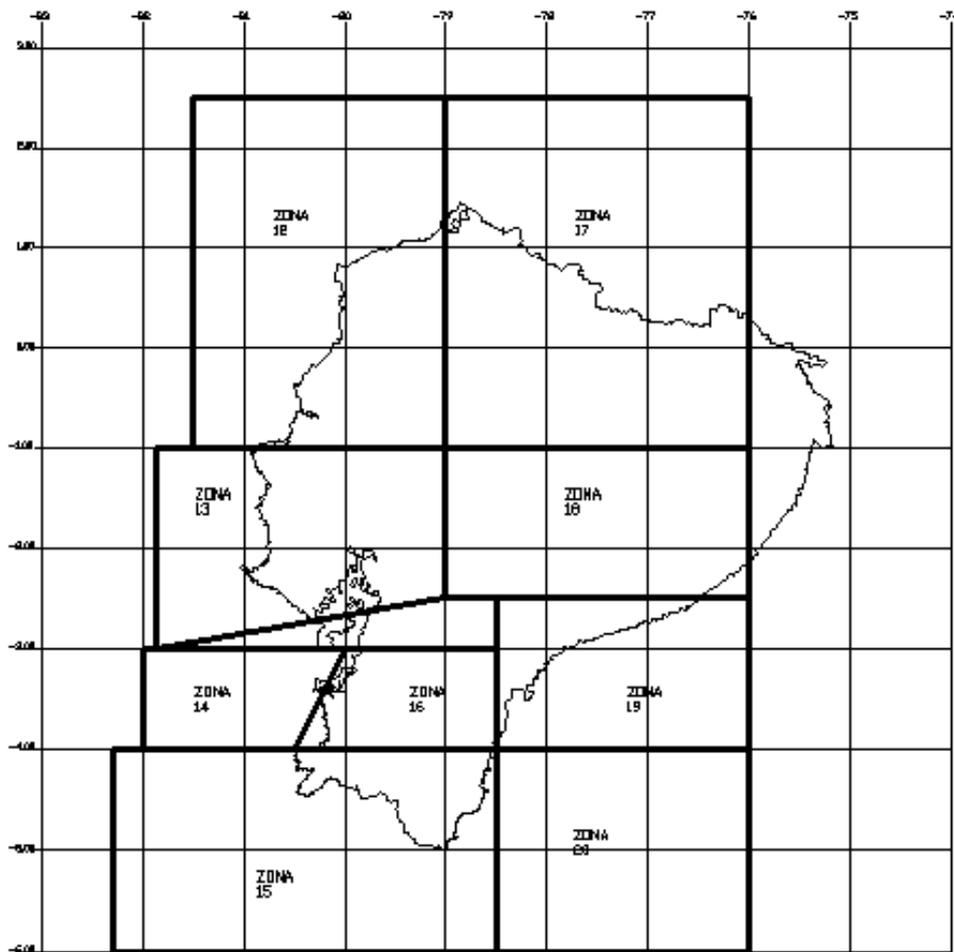
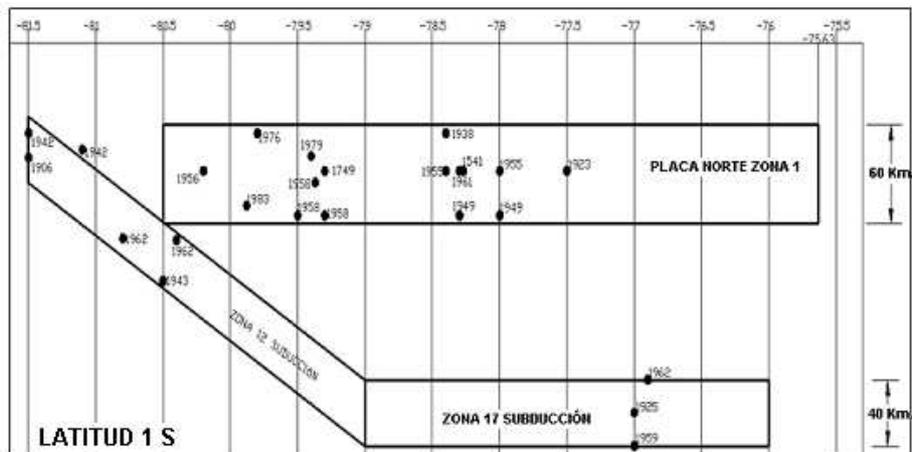


Figura 2 Zonas fuentes asociadas con la subducción



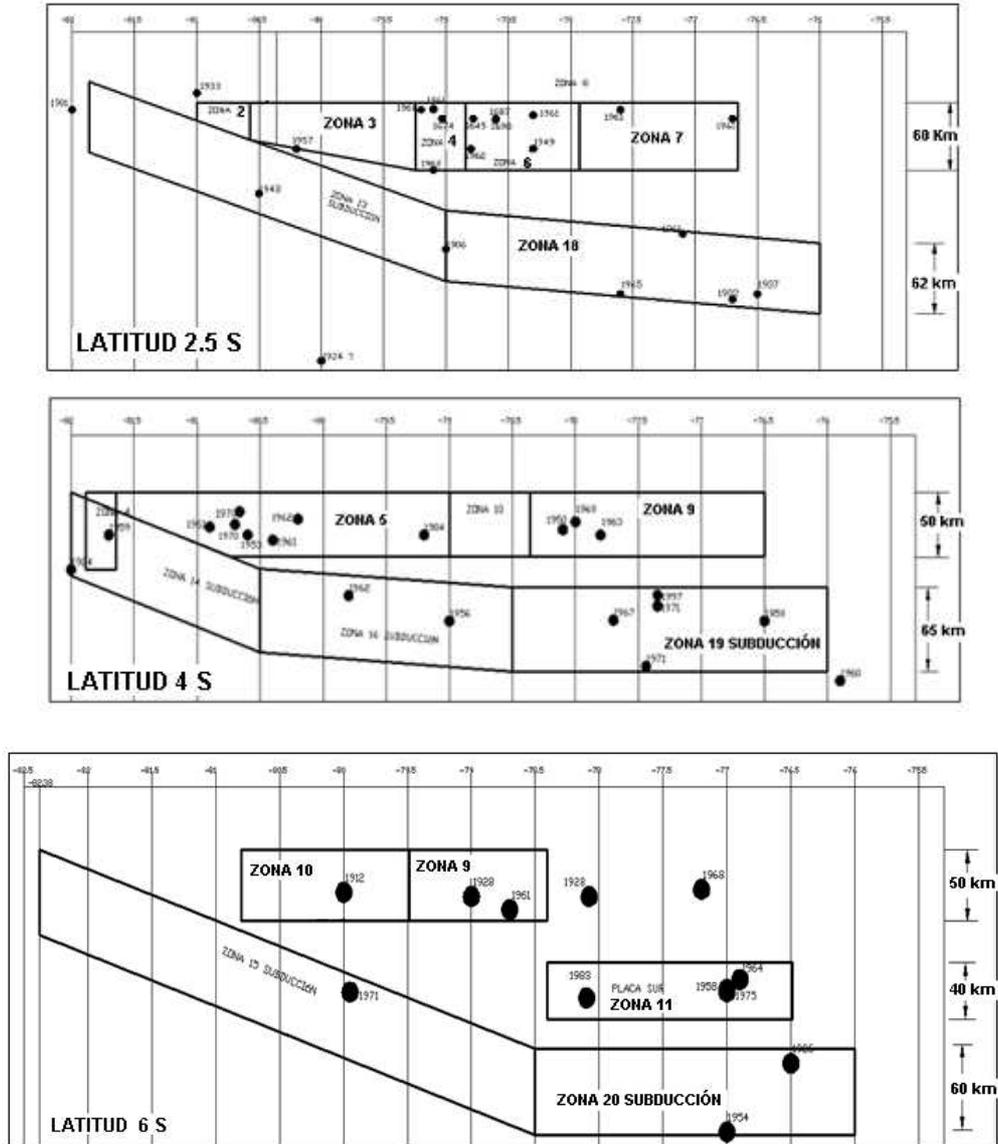


Figura 3 Cortes de la Placa en latitudes: 1° S, 2.5° S, 4°S y 6°S.

En la evaluación de la peligrosidad sísmica de Colombia para la normativa NSR-98, utilizaron las ecuaciones propuestas por Ambrasseys para determinar la magnitud máxima, estas son:

$$\begin{aligned}
 L &= e^{(1.150M_{mx}-3.35)} && \text{Limite Inferior} \\
 L &= e^{(1.596M_{mx}-7.56)} && \text{Mejor Ajuste} \\
 L &= e^{(1.615M_{mx}-8.58)} && \text{Limite Superior}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Se aprecia que la relación entre la Magnitud Máxima M_{max} y el logaritmo de la longitud de rotura es de tipo lineal, de la forma:

$$M_{max} = A \log L + B$$

Donde A y B son constantes que se obtienen por regresión lineal. Es conveniente que los valores de A y B se obtengan con sismos de una determinada zona geográfica como lo propone Acharya (1979). Por otra parte, Slemmons (1977) propone calcular la magnitud máxima en base al tipo de falla, es así como propone tres ecuaciones una para falla normal, otra para falla inversa y otra para falla transcurrente, todo esto fue obtenido con sismos registrados en el Occidente de los Estados Unidos.

Cuando en una zona fuente, no se tiene un tipo de falla definido es conveniente utilizar la metodología propuesta por Acharya. Para América del Sur, Acharya propone la ecuación (5) para encontrar la magnitud máxima, la misma que fue obtenida a partir de 31 eventos con magnitud superior a 7. Por lo tanto, para magnitudes inferiores su aplicación es incierta.

$$M_{max} = 2.30 + 2.83 \log L \quad (5)$$

Por otra parte, Dorbath *et al* (1990) proponen la siguiente ecuación para encontrar la magnitud M_w a partir de la longitud de ruptura L .

$$M_w = 1.62 \log L + 4.44 \quad (6)$$

Lo interesante del trabajo de Dorbath *et al* (1990) es la forma como determinan la longitud de ruptura L . Lo hace midiendo el eje mayor de la curva de isosista de intensidad VIII en la escala de Mercalli, para esto mediante el estudio de las réplicas de varios sismos demuestra que la longitud mayor del área de las réplicas es aproximadamente igual a la longitud del eje mayor de la curva de isosistas de intensidad VIII.

Callo y Tavera (2002) incorporan un factor de ajuste K a la ecuación de Dorbath *et al* (1990) para poder encontrar la magnitud M_w a partir de isosistas de diferentes intensidades.

$$M_w = 1.62 \log \left(\frac{L}{K} \right) + 4.44 \quad (7)$$

Cuando se trabaja con la Isosista de Intensidad VIII el valor de $K = 1$, para intensidad VII, se tiene $K = 2$. Para intensidad VI, el valor de $K = 4$. Lo importante es notar que se puede hallar la longitud de ruptura a partir de las curvas isosistas de intensidades. Si se trabaja con la curva de intensidad VIII se halla directamente la longitud de ruptura, si se trabaja con la curva de intensidad VII se divide para dos la longitud mayor de la curva de intensidad y si se trabaja con la curva de intensidad VI se divide para cuatro, con lo que se halla la longitud de ruptura, en forma aproximada.

3. ANÁLISIS DE ALGUNOS SISMOS REGISTRADOS EN ECUADOR

Con el propósito de comprobar la propuesta de Dorbath *et al* (1990) y de Callo y Tavera (2002) en el sentido de que la longitud mayor de la curva de isosistas de intensidad VIII es aproximadamente igual a la longitud de la zona donde se producen las réplicas y esta es a su vez es la longitud de ruptura del sismo. Se estudian los sismos del 4 de agosto de 1998, conocido con el nombre del sismo de Bahía de Caráquez, Aguiar *et al* (1998). El sismo del 2 de octubre de 1995, conocido como el sismo de Macas, Aguiar (2000) y el sismo del 3 de Marzo de 1987, conocido como el sismo de Baeza. Se destaca que las isosistas de estos sismos fueron realizadas por Egred (1988, 1999).

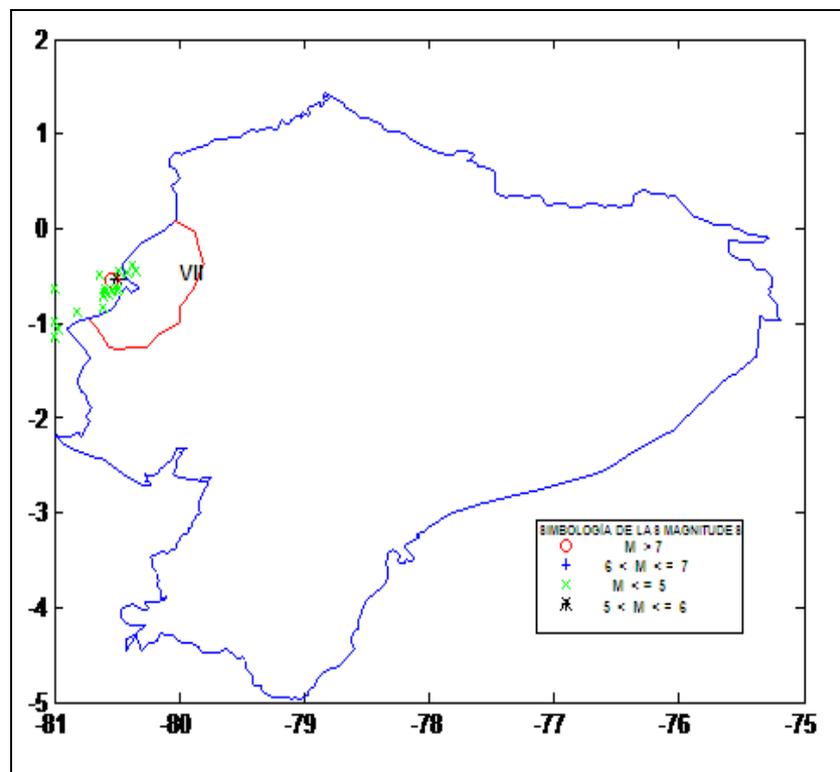


Figura 4 Réplicas del sismo de Bahía de Caráquez y curva de Intensidad VII.

En la figura 4 se presenta el epicentro del sismo del 4 de agosto de 1998 y las réplicas registradas hasta diciembre de ese mismo año. La longitud de la superficie de réplicas es 75.48 km., También se ha dibujado la curva de Intensidad VII, en ella se tiene que la longitud mayor es 150.96 km. Como es la curva de intensidad VII, para hallar la longitud de ruptura se divide para 2, Callo y Tavera (2002) con lo que se obtiene 96.65 km.

En la figura 5 se aprecia el epicentro y las replicas del sismo del 2 de octubre de 1995 que tuvo una magnitud $M_s = 6.5$. La longitud de la superficie de las réplicas es 65.72 km., y la longitud mayor

de la curva de intensidad VIII es 62.38 km. Se tiene una muy buena aproximación entre estos dos parámetros.

En la figura 6 se aprecia el epicentro del sismo de Baeza y las pocas réplicas del mismo, lamentablemente solo se tienen 7 réplicas registradas no porque no haya habido sismos después del terremoto del 5 de marzo de 1987, sino por que simplemente no se tienen registros. Con esta acotación la longitud de las pocas réplicas es 45.38 km. La longitud de la isosita de intensidad VIII es 73.03 km.

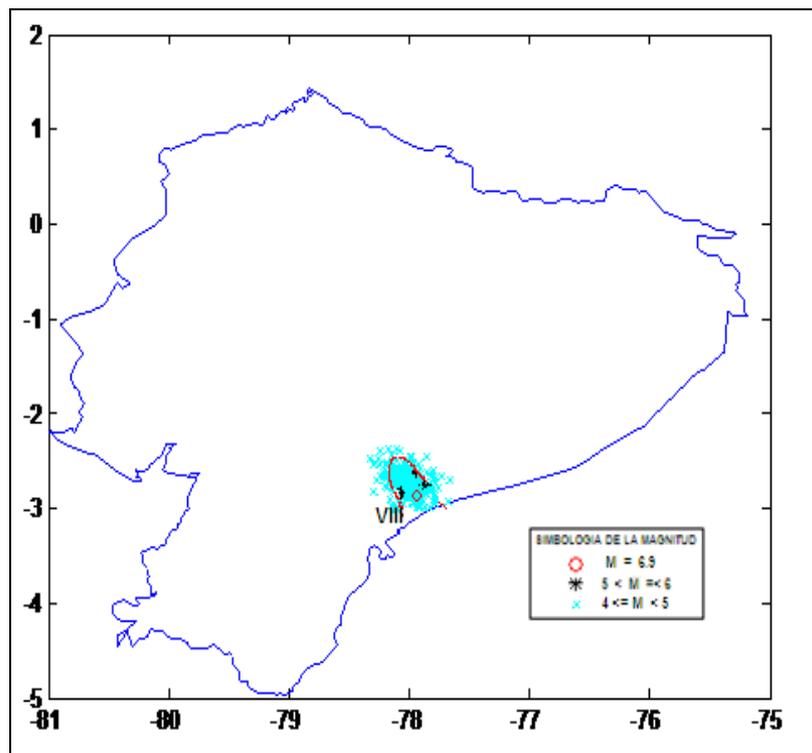


Figura 5 Réplicas del sismo de Macas y curva de Intensidad VIII.

Si bien es cierto, son solamente tres sismos los que se han analizado, sin embargo de ello hay una buena aproximación entre la longitud mayor de las réplicas y la longitud inferida de la curva de isosista. Resultados similares los encontró Callo y Tavera (2002) para el Perú.

Tabla 1 Longitud de superficie de réplicas e inferida de curva de isosista.

Sismo	Longitud de superficie de réplicas (km)	Longitud inferida de curva de isosista (km)
Bahía de Caráquez (1998)	75.48	96.65
Macas (1995)	65.72	62.38
Baeza (1987)	45.38	73.03

4. RELACIÓN ENTRE LONGITUD DE RUPTURA Y MAGNITUD

Una vez que se comprobó que las propuestas de Dorbath *et al* (1990) y de Callo y Tavera (2002), dan resultados satisfactorios para los sismos registrados en el Ecuador, se procedió a encontrar una relación entre magnitud máxima M_w y la longitud de ruptura L . Pero antes de eso, los sismos de magnitud M_b y M_s se pasaron a magnitud M_w , con las siguientes ecuaciones. Cahuari (2006)

$$M_w = 0.9588 M_b + 0.458$$

$$M_w = 0.7044 M_s + 1.702 \tag{8}$$

La primera ecuación es para sismos con magnitud M_b entre 5.1 y 6.8. La segunda ecuación en cambio se aplica para sismos con magnitud M_s comprendidos entre 4.5 y 6.8.

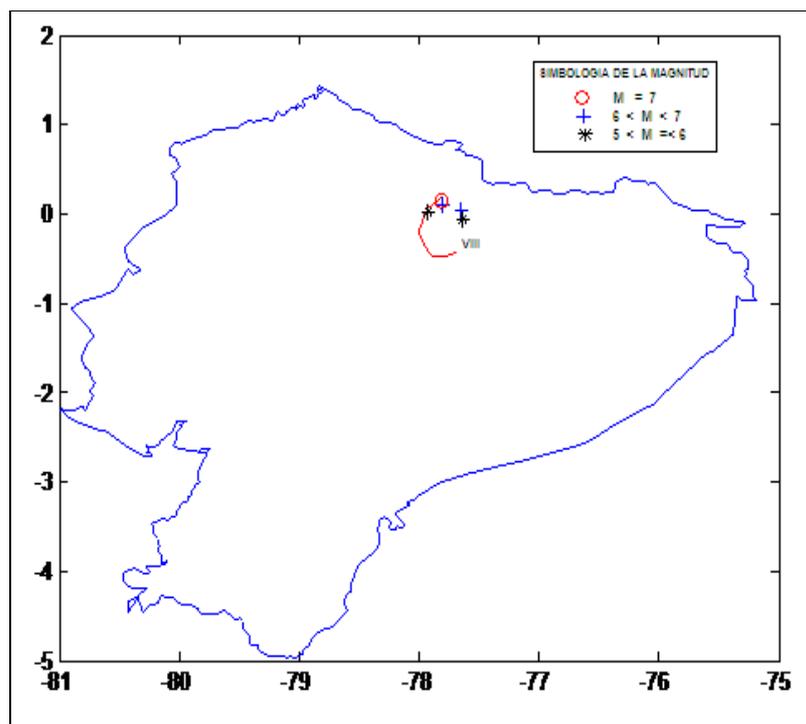


Figura 6 Réplicas del sismo de Baeza y curva de Intensidad VIII.

La mayor parte de las isosistas de los sismos que se consideran en el estudio fueron realizadas por Eged (1988, 1999, 2009) pero también hay isosistas que constan en el estudio de peligrosidad sísmica desarrollado para el Proyecto Hidroeléctrico Coca-Codo Sinclair. Pasquaré G., (1988).

En la figura 7 se presentan dos de estas isosistas y corresponden al sismo de 1797 que destruyó la antigua ciudad de Riobamba y a la del sismo de 1995 que llevó al colapso al puente colgante sobre el río Upano. En Castro (2009) se encuentran todas las isosistas utilizadas en el estudio.

En la tabla 2 se muestran los 19 sismos con los cuales se encontró una relación entre la longitud de ruptura L con la magnitud M_w . Se indica también la longitud máxima de la curva de intensidades, utilizada y en la última columna de la tabla se muestra la longitud de ruptura utilizando la propuesta de Callo y Tavera (2002).

En la figura 8 se presenta la magnitud y longitud de ruptura de los 19 sismos de la tabla 2, se indica también la recta hallada en este estudio y la recta que se obtiene con la propuesta de Dorbath *et al* (1990). Se nota que la propuesta de Dorbath *et al* (1990) reporta valores más altos de magnitud pero son comparables sus valores con la hallada en este estudio. La ecuación encontrada en este trabajo es:

$$M_w = 4.519 + 1.358 \log L \quad (9)$$

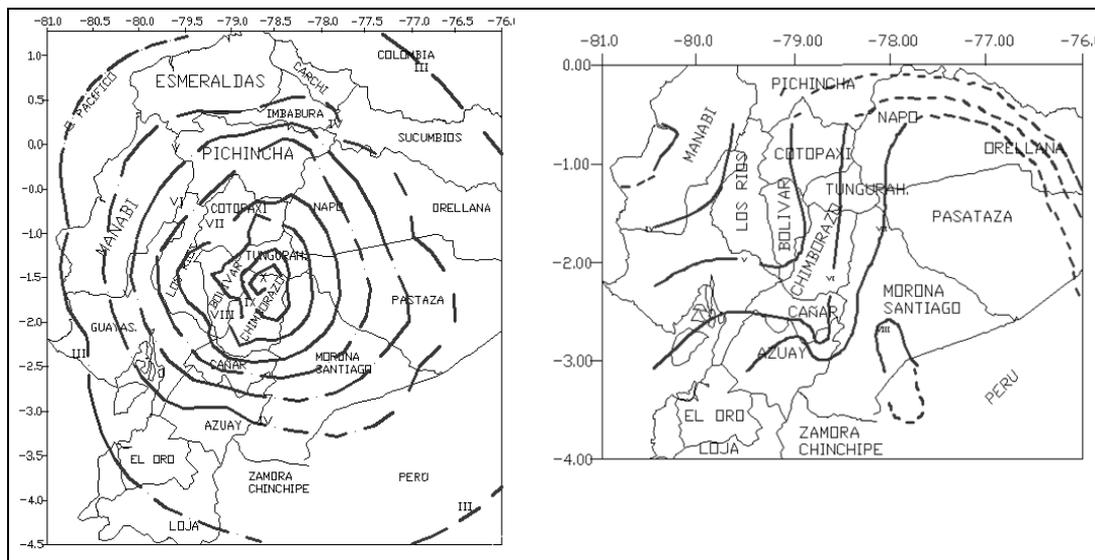


Figura 7 Isosistas de los sismos de Riobamba de 1797 y Macas de 1995.

5. MAGNITUD MÁXIMA ESPERADA EN CADA ZONA FUENTE

Egred (2009), en base a las isosistas de 129 sismos, obtuvo un mapa de peligrosidad sísmica del Ecuador pero de Intensidades Sísmicas en la escala de Mercalli. Este mapa se presenta en la figura 9.

Pero en la figura 9, sobre el mapa de intensidades máximas se han colocado las zonas fuentes asociadas a fallamiento local, descritas en el apartado 1, con el propósito de encontrar la magnitud máxima esperada en cada zona fuente, para ello se obtuvo la longitud de ruptura por medio de la curva de intensidades y luego se encontró la magnitud máxima esperada en la fuente empleando las ecuaciones (9) y (6). Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3. En la última columna de esta tabla se ha colocado la magnitud máxima que ha sido registrada instrumentalmente desde 1540 a 2009.

Tabla 2 Sismos considerados para relacionar longitud de ruptura con magnitud máxima.

#	SISMOS	FECHA	M	Mw	LONGITUD MÁXIMA EN LAS INTENSIDADES			LONGITUD DE ROTURA L (km)
					VIII	VII	VI	
1	RIOBAMBA	04-02-1797	7.7	7.70	158.67			158.67
2	IBARRA	16-08-1868	7.17	7.17	102.65			102.65
3	ESMERALDAS	31/01/1906	8.6	8.60	228.05			228.05
4	PASTO CALLE	15/09/1944	5.7	5.92			23.13	5.78
5	PELILEO	05/08/1948	6.75	6.93	52.36			52.36
6	AMBATO	05/08/1949	6.17	6.37	41.00			41.00
7	NAPO	11/05/1955	6.8	6.98	15.00			15.00
8	BAHÍA	16/01/1956	7.3	7.30	78.82			78.82
9	ESMERALDAS	10/01/1958	7.8	7.80		105.71		52.86
10	PASA	30/07/1960	5.75	5.97		19.56		9.78
11	ALAUÍ	08/04/1961	5.79	6.01		31.30		15.65
12	BAHÍA	19/05/1964	5.4	5.64	76.19			76.19
13	NABON	22/03/1966	6	6.21	33.45			33.45
14	PASTO CALLE	06/10/1976	5.7	5.92	30.41			30.41
15	ESMERALDAS	09/04/1978	6.1	6.31		85.38		42.69
16	BAEZA	03/05/1987	7	7.00	73.03			73.03
17	BAHIA DE CARAQUES	08/04/1998	7.1	7.10		150.96		75.48
18	MACAS	03/10/1995	6.9	6.90	62.38			62.38
19	PUJILI	28/03/1996	5.7	5.72			39.39	9.85

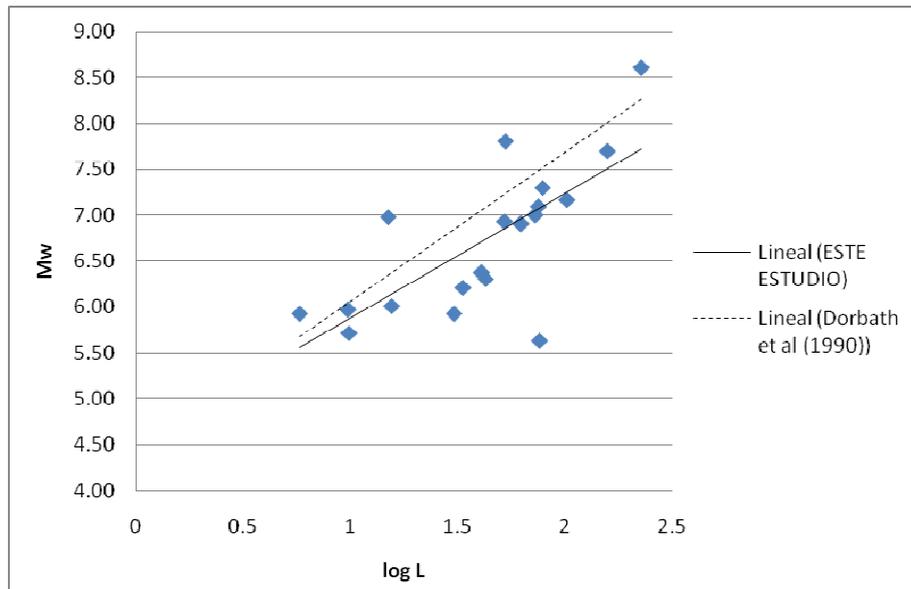


Figura 8 Relación entre magnitud M_w y longitud de ruptura L .

En la tabla 3 se aprecia que las magnitudes máximas obtenidas, con la ecuación hallada en este estudio son más parecidas a la magnitud máxima registrada instrumentalmente, son más parecidas en relación a las que se hallan con la ecuación de Dorbath.

Tabla 3 Magnitudes máximas esperadas en cada zona fuente.

ZONA	INTENSIDAD (Mercalli)	L (km)	M_w (Este estudio)	M_w (Dorbath)	M_w (Registrada)
ZONA 1	VII	209.24	7.7	8.2	7.8
ZONA 2	VII	61.05	6.9	7.3	6.5
ZONA 3	VII	80.12	7.1	7.5	5.8
ZONA 4	VII	107.47	7.3	7.7	7.4
ZONA 5	VIII	186.96	7.6	8.1	7.8
ZONA 6	VII	99.31	7.2	7.7	8.1
ZONA 7	VI	67.87	7.0	7.4	6.9
ZONA 8	VI	20.95	6.3	6.6	6.8
ZONA 9	VI	76.65	7.1	7.5	7.3
ZONA 10	VI	65.67	7.0	7.4	7.0
ZONA 11	VI	48.42	6.8	7.2	6.4

Las magnitudes máximas que deben considerarse en un estudio de peligrosidad sísmica del Ecuador, deben ser mayores a las registradas instrumentalmente. Este criterio sirve para el caso en que la magnitud máxima hallada en base a la longitud de ruptura sea menor que la magnitud máxima registrada instrumentalmente. Para los sismos de subducción se trabajará con las magnitudes máximas registradas instrumentalmente. En base a estos resultados en la tabla 4 se presentan las magnitudes máximas que deben considerarse en cada zona fuente.

Tabla 4 Magnitudes máximas esperadas en cada una de las zonas fuentes.

Fallamiento Local		Subducción	
Zona	M_w	Zona	M_w
1	7.8	12	8.6
2	6.9	13	7.5
3	7.1	14	6.9
4	7.4	15	7.1
5	7.8	16	6.4
6	8.1	17	6.4
7	7.0	18	7.1
8	6.8	19	7.5
9	7.3	20	6.6
10	7.0		
11	6.8		

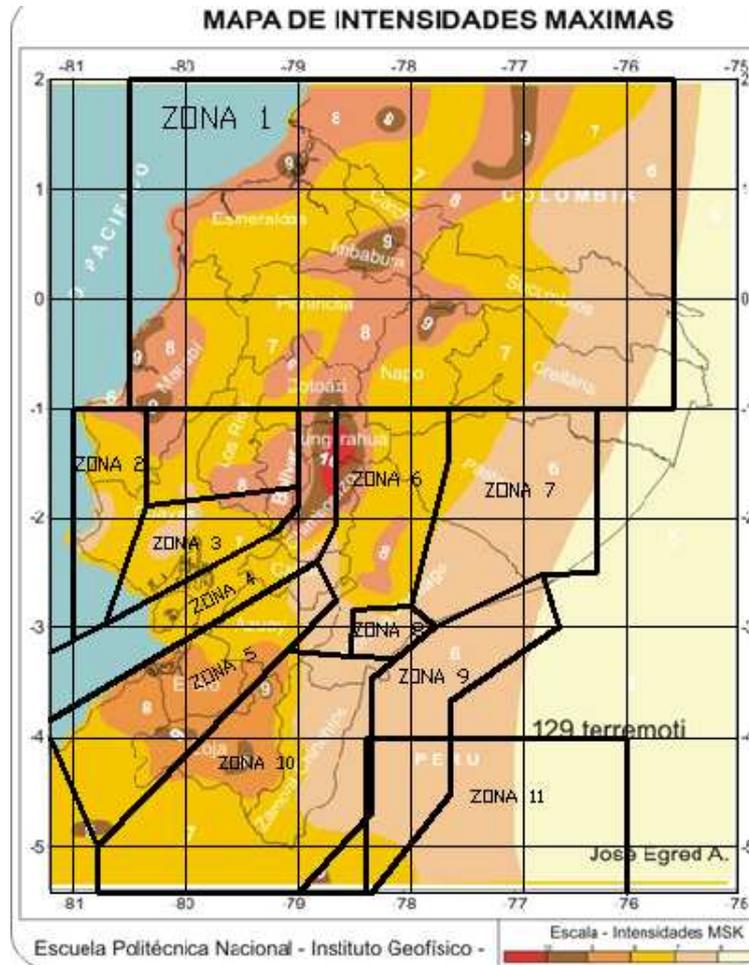


Figura 9 Mapa de intensidades máximas registradas en el Ecuador.

6. CONCLUSIONES

En base al estudio de las isosistas de 19 sismos registrados en el Ecuador se ha determinado una relación entre la Magnitud y la Longitud de ruptura, considerando que la longitud de la curva de la isosista de intensidad VIII es aproximadamente igual a la longitud máxima de las réplicas del sismo y por ende de la longitud de ruptura. Previamente se vio la validez de esta hipótesis al encontrar estas longitudes en los sismos de Baeza de 1987, de Macas de 1995 y de Bahía de Caráquez de 1998.

Posteriormente se aplicó esta ecuación, para determinar la magnitud máxima esperada en las zonas fuentes, trabajando con un mapa de peligrosidad sísmica del Ecuador de Intensidades en la escala de Mercalli. La longitud máxima encontrada de esta manera, en cada zona fuente es muy parecida a la magnitud máxima registrada instrumentalmente entre 1540 y 2009.

Finalmente para cada una de las zonas fuentes de fallamiento local se determinó la magnitud máxima como el valor mayor entre la magnitud máxima registrada instrumentalmente y la magnitud

inferida a partir de la longitud de ruptura. Para las zonas fuentes asociadas a la subducción, la magnitud máxima esperada, se consideró igual a la magnitud máxima registrada instrumentalmente en el período ya señalado.

REFERENCIAS

1. Aguiar R., (1982), *Cuantificación de la amenaza sísmica del Ecuador en términos probabilísticas y mapa de zonificación*, Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Central de Venezuela, 179 p., más anexos, Caracas, Venezuela.
2. Aguiar R., (1991), "El sismo del 4 de febrero de 1797", *VI Jornadas Nacionales de Ingeniería Estructural. Escuela Politécnica Nacional*, Quito.
3. Aguiar R., Romo P., Torres M., Caiza P., (1998), *El sismo de Bahía*, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, 125 p., Quito.
4. Aguiar R., (2000), *Sismo de Macas de 1995 y la reconstrucción*, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, 72 p., Quito.
5. Aguiar R., y Castro C., (2009), "Zonas fuentes para estudios de peligrosidad sísmica en el Ecuador", *En revisión arbitral. Centro de Investigaciones Científicas*, 21 p.
6. Acharya H., (1979), "Regional variations in the rupture-length magnitude relationships and their dynamical significance", *Bulletin of Seismological Society of America*, **69 (6)**, 2063-2084.
7. Castro C., (2009), *Determinación de la peligrosidad sísmica del Ecuador en base a curvas de isoaceleración*, Tesis de Grado para obtener el título de Ing. Civil. Escuela Politécnica del Ejército.
8. Cahuari A., (2006), "Análisis estadístico de M_0 a partir de la magnitud local M_L ", *Compendio de trabajos de investigación CNDG-Biblioteca. Instituto Geofísico del Perú*, **V 7**, 27-42. Lima, Perú.
9. Callo F., Tavera H., (2002), "Estimación de M_w a partir de isosistas de intensidad máxima para sismos de subducción ocurridos en el Perú", *Compendio de trabajos de investigación, CNDG-Biblioteca, Instituto Geofísico del Perú*, **V. 3**, 59-70, Lima.
10. Chunga K., Zamudio Y., Egred J., Marín G., Quiñónez M., Iturralde D., (2005), "The 12 Dic, 1953, Earthquake, Ms 7.3, Ecuador-Peru Border Region: A case study for applying the New INQUA Intensity Scale", *Abstract Vol. Dark Nature Rapid natural Change and Human Responses, Final Meeting of the Dark Nature Project*, p. 57-58, Como, Italy.
11. Chunga K., (2009), "Zonificación sísmica a través del análisis estructural de fallas geológicas y sismicidad histórica e instrumental", *Encuentro Internacional sobre gestión del Riesgo Natural con énfasis en el Sector Eléctrico. Universidad San Francisco de Quito*, Quito, Ecuador.
12. Dorbath L., Cisterna A., Dorbath C., (1990), "Assessment of the size of large and great historical earthquakes in Peru", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **80 (3)**, 551-576.

13. Egred J., (1988), *Terremoto de la Provincia del Napo*. Instituto Geofísico. Escuela Politécnica Nacional, 56 p., Quito.
14. Egred J., (1999), *Los terremotos y su incidencia en el Ecuador*. Instituto Geofísico. Escuela Politécnica Nacional, Quito.
15. Egred J., (2009), *Historia sísmica del Ecuador*. Instituto Geofísico. Escuela Politécnica Nacional. Material inédito por publicar, Quito.
16. Grases J., (1985) *Fundamentos para la elaboración del nuevo mapa de zonificación sísmica de Venezuela con fines de Ingeniería*, FUNVISIS. Fundación Venezolana de Ingeniería Sísmica, Serie Técnica **05-84**, 32 p., Caracas.
17. Pasquaré G., (1988), *Sismología y Tectónica*, Proyecto Hidroeléctrico Coca-Codo Sinclair. Anexo H. INECEL Instituto Ecuatoriano de Electrificación, 152 p., más anexos, Quito, Ecuador.
18. Slemmons D., (1977), "State-of-the-art for assessing earthquake hazards in the United States, Report 6. Faults and earthquake magnitude:U.S.", *Army Corps of Engineers, Waterways Experimental Station, Soil and Pavements Laboratory*, Vicksburg, Mississippi, Miscellaneous Paper **S-73-1**, 129 p

LEY DE ATENUACIÓN PARA ESTUDIOS DE PELIGROSIDAD SÍSMICA DEL ECUADOR

Roberto Aguiar Falconí y Celia Castro Torres

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

RESUMEN

Se presentan 20 curvas de isosistas correspondientes a 19 sismos ocurridos en el Ecuador y 1 sismo ocurrido en Colombia, los mismos que causaron daños severos en las estructuras de nuestro país.

En base a un modelo de ley de atenuación se procede a elaborar en base a las curvas isosistas una ley de atenuación acorde a las exigencias geotectónicas de nuestro país la cual será válida para las zonas de fallamiento local y para roca, la misma que será evaluada en base a otras leyes elaboradas en el resto de países de Suramérica.

ABSTRACT

The 20 isoseismal curves for 19 earthquakes occurred in Ecuador and 1 earthquake occurred in Colombia, the same that caused severe damage in the structures of our country.

Based on a model law of attenuation is to develop on the basis of a law isoseismal curves attenuation geotectonic commensurate with the demands of our country which will be valid for the zones of faulting and local rock, which will be evaluated on the basis of other laws made in other countries of South America.

1. INTRODUCCIÓN

Las leyes de atenuación son expresiones semiempíricas que relacionan magnitud-distancia-intensidad sísmica. Entendiéndose por esta última palabra a la aceleración, velocidad, desplazamiento e intensidad propiamente dicha de eventos sísmicos; estas relaciones se obtienen de los datos que existen sobre los parámetros mencionados. Aguiar (1982).

Una hipótesis, con la cual se obtienen estas leyes de atenuación, es suponer que los movimientos del suelo se van atenuando conforme la distancia epicentral se incrementa. En términos generales esto es cierto, aunque hay casos, en que a una misma distancia epicentral se tengan varias aceleraciones del suelo o que a mayor distancia epicentral se tenga una mayor aceleración, son casos que se dan pero por lo general a mayor distancia menores intensidades de los movimientos del suelo.

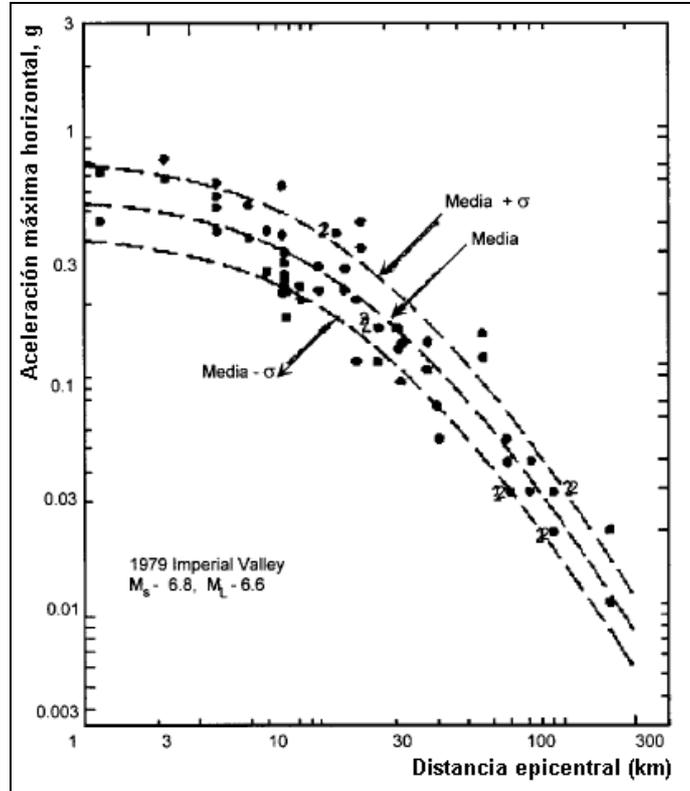


Figura 1 Aceleraciones máximas registradas en el sismo de 1979 en Imperial Valley.

En la figura 1, se presentan las aceleraciones máximas del sismo de 1979 en Imperial Valley, California, registrado en diferentes estaciones. A 1 km., del epicentro, se aprecia en la figura 1, que la aceleración máxima de la componente horizontal varió entre 0.4 y 0.8 g., siendo g., la aceleración de la gravedad; a 10 Km., del epicentro estuvo entre 0.15 y 0.60 g., a 100 km., del epicentro varió entre 0.01 y 0.04 g. Miranda (2002).

En la figura 1, se observa la curva de valores medios, que vendría a representar la ley de atenuación para el sismo de Imperial Valley de 1979 y una muy buena cantidad de registros se encuentran entre el valor medio $\pm \sigma$. Siendo σ la desviación estándar. Por lo tanto, cuando se hablen de leyes de atenuación, por la incertidumbre que ellas tienen es necesario incluir un término que contenga la desviación estándar.

Se puede pensar que obtener una ley de atenuación de movimiento de suelo, es bastante sencillo que todo lo que se requiere es tener suficiente cantidad de registros sísmicos y aplicar técnicas de regresión lineal para encontrar la ley, pero no es así. En efecto, Ordaz *et al* (1989) a partir de 64 registros de la red sísmica de Guerrero con magnitudes entre 3 y 8.1, obtuvieron la siguiente ley de atenuación siguiendo la metodología propuesta por Joyner y Boore (1981).

$$E(\log A_{\max}) = 1.76 + 0.3 M - \log R - 0.0031 R \tag{1}$$

Donde A_{\max} es la aceleración máxima del suelo en cm/s^2 ; $E(\)$ es el valor esperado; R es la mínima distancia al área de la falla; M es la magnitud. La desviación estándar del logaritmo común de la A_{\max} es 0.25. Ahora bien, Ordaz (1999) compara las aceleraciones máximas registradas (cuadros) durante el sismo del 21 de octubre de 1995 que tuvo una magnitud de 7.2., a la izquierda de la figura 2 y la obtenida con la ecuación (1) y se aprecia que todos los valores registrados tienen aceleraciones mayores a las predichas; se ha dibujado la curva de valores medios y las curvas correspondientes a los percentiles 16 y 84, que corresponden a menos y más una desviación estándar.

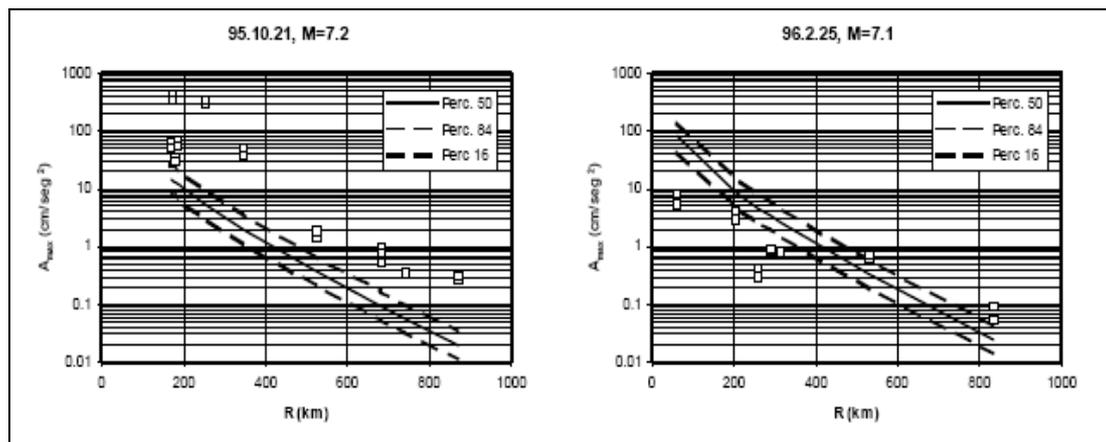


Figura 2 Aceleraciones máximas registradas y estimadas con ecuación 1. Ordaz (1999).

A la derecha de la figura 2 se muestra las aceleraciones máximas registradas (cuadros) durante el sismo del 25 de febrero de 1996, de magnitud 7.1 y las predichas con la ecuación (1). Ahora los valores registrados son menores a los predichos con la ecuación (1) para valores de $R < 400 \text{ km}$. y son mayores a las que se hallan con la ecuación (1) más σ .

Todo esto demuestra que hay mucha incertidumbre en la formulación de leyes de atenuación, de pronto hay otras variables que deben ser incorporadas en la ley. Pero por otro lado también se debe pensar en utilizar valores más altos de la desviación estándar.

2. CARENCIA DE REGISTROS

En una buena parte de Países, con alta peligrosidad sísmica no se tienen acelerogramas de sismos fuertes, con lo que se complica aún más la obtención de leyes de atenuación. Entonces no queda otra opción, que determinar leyes de atenuación de Intensidades en la escala de Mercalli I_{MM} , a sabiendas que esta Intensidad tiene también incertidumbre, como por ejemplo la escala no considera el tipo de suelo en la evaluación del grado de daño de una estructura y es muy bien conocido que el tipo de suelo sí influye en el comportamiento de la estructura.

En forma general las curvas isosistas sí dan una idea de la atenuación del movimiento del suelo durante un sismo, si indican por donde se atenuó más rápidamente el movimiento y por donde se propagó más lentamente este movimiento, de tal manera que si es bastante confiable encontrar leyes de atenuación de Intensidades a partir de las curvas de isosistas.

Lo difícil es como pasar esas intensidades a aceleraciones máximas de movimiento del suelo. La forma de hacerlo es mediante una ecuación de la siguiente forma:

$$\log A_{\max} = \sigma I_{MM} + \gamma \tag{2}$$

Algunos valores de σ y γ se indican en la tabla 1 y han sido obtenidos en base a datos de Intensidades, I_{MM} y aceleraciones máximas del suelo, A_{\max} .

Tabla 1 Valores de σ y γ

AUTOR	σ	γ
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 Baumgartner (1978)	0.26	0.19
	0.31	-0.4
Medvedev-Sponheuer (1969)	0.30	-0.1

En las cinco primeras ecuaciones 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:

$$0.3 I_{MSK} - 0.4 \leq \log A_{\max} \leq 0.30 I_{MSK} - 0.1 \tag{3}$$

Esta última ecuación fue utilizada en la evaluación de la peligrosidad sísmica del proyecto hidroeléctrico Coca-Codo-Sinclair, que está en construcción actualmente en el Ecuador. Pasquaré (1988).

3. LEYES DE ATENUACIÓN MACROSÍSMICAS

En la literatura existen una gran cantidad de modelos de leyes de atenuación para Intensidades, entre los que se destacan los propuestos por Sponheuer (1960); Shebalin (1968); Howel y Schultz (1975), entre otros.

El modelo de Sponheuer (1960), basado en el trabajo de Kovesligethy (1907) fue utilizado en el proyecto Coca-Codo-Sinclair y es el siguiente:

$$I_0 - I_i = k \log \left(\frac{D_i}{h} \right) - b * (D_i - h) \tag{4}$$

Donde I_0 es la intensidad macrosísmica en el epicentro; I_i es la intensidad de la isosista con radio medio R_i ; D_i es la distancia hipocentral, $D_i = \sqrt{R_i^2 + h^2}$; h es la profundidad hipocentral; k, b son coeficientes que deben determinarse en base a las isosistas macrosísmicas.

El modelo de Shebalin(1968) fue derivado a partir de la atenuación de la energía disipada desde un foco puntual. La ecuación propuesta es la siguiente.

$$I_i - I_0 = A + B \ln R + C R \quad (5)$$

Todas las variables han sido definidas, faltando indicar que A, B, C , son coeficientes a determinar en base las curvas isosistas.

Otra ley basada en conceptos energéticos es la de Blake-Shebalin y es adecuada para atenuaciones físicas pequeñas. Su ecuación es la siguiente. Shebalin (1968)

$$I_i = I_0 - \gamma \log \sqrt{\frac{R_i^2 + h^2}{h^2}} \quad (6)$$

En este caso el coeficiente γ se determinará con las curvas isosistas disponibles.

En los modelos presentados no se incluye la Magnitud, como parte de la ley de atenuación, siendo este un parámetro fundamental, de ahí la importancia del modelo propuesto por Howel y Schultz (1975) que se indica a continuación.

$$I_i = A M + B \ln R + C R + D \frac{I_0}{R} \quad (7)$$

Donde M es la magnitud y A, B, C, D son los coeficientes a determinar con las isosistas disponibles. Existen algunas variantes a la ecuación (7) como se observa en la tabla 2 en que se presentan algunas leyes de atenuación de Intensidades para países de América del Sur.

Las Intensidades se transforman en aceleraciones máximas del suelo, mediante la ecuación (2) y utilizando alguna de los coeficientes indicados en la tabla 1. Para Venezuela, por ejemplo, se trabajó con la propuesta de Murphy y O' Brien (1977). Para el Ecuador con la propuesta de Saragoni *et al* (1982). Con esta acotación en la tabla 3 se presentan las leyes de atenuación de aceleraciones obtenidas a partir de isosistas.

En la figura 3 se presentan las curvas de atenuación de la aceleración máxima del suelo, encontradas con las ecuaciones de la tabla 3. Para Venezuela se trabajó con la ley propuesta por Quijada *et al* (1993), que por cierto se denomina ley de INTEVEP. Se obtuvo la atenuación para un sismo de magnitud $M_b = 6$, para el caso de Venezuela este sismo corresponde a $M_s = 5.92$. Es necesaria esta aclaración debido a que en la propuesta de Quijada *et al* (1993) se trabaja con magnitud M_s y en las restantes ecuaciones con M_b . También se debe aclarar que Quijada *et al* (1993) trabaja con la distancia al hipocentro D , en cambio en las otras ecuaciones se trabaja con la distancia al epicentro R . En la obtención de las curvas que se encuentran en la figura 3 se considero que $D = R$.

La ecuación propuesta por Saragoni *et al* (1982) para Chile y Argentina presenta valores muy bajos de aceleración máxima del suelo. La ecuación de Casaverde (1980) para el Perú es la que reporta valores más altos y las tres restantes tienen valores comprendidos entre estas dos ecuaciones. Se consideró que la desviación estándar es nula en las curvas de la figura 3, es decir se trata de curvas de valores medios.

Tabla 2 Leyes de atenuación de Intensidades macrosísmicas.

Autor	País de aplicación	Ley de atenuación
Grases (1980)	Venezuela	$I = I_0 + 2.60 - 0.0041R - 2.22 \log(R + 20)$ Oriente $I = I_0 + 1.20 - 0.0063R + 1.68 \log(R + 20)$ Centro y Occidente
Gershanik y Gajardo (1983)	Venezuela	$I = 6.44 + 0.92 M_b - 3.33 \log(D + 10)$ $\sigma_{\log Ah} = 0.70$
Gómez y Salcedo	Colombia	$I = I_0 - 0.019(R - 15) - 0.76 \ln(R - 15)$ $\sigma = 0.29$ Para $h \leq 20$ km $I = (2.3M_b - 6.8) * 1.1R^{-0.06} * e^{-0.001R}$ $\sigma = 0.51$ Para $h \leq 60$ km $I = I_0 * 1.26 * e^{-0.004R}$ $r = 0.89$ (correlación) Para $h > 60$ km
Aguiar (1982)	Ecuador	$I = I_0 - 1.3 - 0.0045 R - 0.61 \log R$ $\sigma = 0.6$ Para la Sierra $I = I_0 - 0.7 - 0.0087 R + 0.26 \log R$ $\sigma = 0.6$ Para la Costa
Aguiar (1988)	Ecuador	$I = 8.645 + 1.256 M_b - 2.226 \ln(R + 40)$ $\sigma = 0.5$
Saragoni (1980)	Perú y Chile	$I = 8.19 + 0.94 M - 1.76 \ln(R + 40)$

Tabla 3 Leyes de atenuación de aceleraciones máximas del suelo

Autor	País de aplicación	Ley de atenuación
Gershanik y Gajardo (1983)	Venezuela	$\log A_{\max} = 4.28 + 0.53 M_b - 0.83 \ln(D + 10)$ $\sigma = 0.70$
Quijada <i>et al</i> (1993)	Venezuela	$\ln A_{\max} = 5.40 + 0.36 M_s - 0.86 \ln(D + 10)$ $\sigma = 0.66$
Aguiar (1988)	Ecuador	$\ln A_{\max} = 6.35 + 0.99 M_b - 1.76 \ln(R + 40)$ $\sigma = 0.6$
Saragoni <i>et al</i> (1982)	Chile-Argentina	$\ln A_{\max} = 8.54 + 0.57 M_b - 1.73 \ln(R + 60)$
Saragoni <i>et al</i> (1982)	Perú	$\ln A_{\max} = 8.18 + 0.68 M_b - 1.63 \ln(R + 60)$
Casaverde (1980)	Perú	$\ln A_{\max} = 4.23 + 0.8 M_b - \ln(R + 25)$

4. LEYES DE ATENUACIÓN INSTRUMENTALES

En el apartado 1 se presentó una ley de atenuación encontrada por Ordaz *et al* (1989) para México, en base a registros sísmicos. Varias ecuaciones similares han sido obtenidas por Mc Guire (1978), ecuación 8; Esteva y Villaverde (1973), ecuación (9); que fueron utilizadas en el Proyecto Hidroeléctrico Coca-Codo Sinclair. Estas ecuaciones son las siguientes:

$$\ln A_{\max} = 3.60 + 0.89 M - 1.17 \ln D \quad (8)$$

$$\sigma = 0.62$$

$$\ln A_{\max} = 8.63 + 0.8M - 2 \ln(D + 40) \quad (9)$$

$$\sigma = 0.64$$

Pero para evaluar la peligrosidad sísmica de Ecuador. Aguiar (1982) utilizó la propuesta de Mc.Guire (1976) siguiente:

$$\ln A_{\max} = 6.16 + 0.64 M - 1.30 \ln(R + 25) \quad (10)$$

En la tabla 4, se muestran varias leyes de atenuación encontradas en base a registros sísmicos y que toman en consideración el tipo del suelo, el tipo de falla, el coeficiente de atenuación inelástico, entre otros factores. Son ecuaciones más elaboradas en relación a las presentadas en las ecuaciones 8 a 10. Para Venezuela, Bendito (2001) y Bendito *et al* (2001) determinaron en base a las ecuaciones de la tabla 4, ecuaciones para roca, estas se presentan en la tabla 5, las ecuaciones de Sadigh *et al* (1993) y de Idris (1993), son las indicadas en tabla 4 para una falla oblicua. En la figura 4 se presenta la variación de la aceleración máxima del suelo en roca, para una magnitud de 6, en la que se ha incluido la ecuación propuesta por Quijada *et al* (1993).

Como se indicó, la ecuación de Quijada *et al* (1993) fue obtenida en base a curvas de isosistas de macrosismos. En cambio las leyes de Boore *et al* (1993), Campbell (1993), Sadigh *et al* (1993) e Idris (1993) fueron halladas en base a registros de acelerogramas, sin embargo de ello se aprecia en la figura 4 que la ecuación de Quijada *et al* (1993) presenta valores medios a los hallados con las otras ecuaciones para distancias epicentrales mayores a 20 Km., para distancias menores a esta cantidad la aceleración encontrada es baja, con relación a las reportadas por las otras ecuaciones.

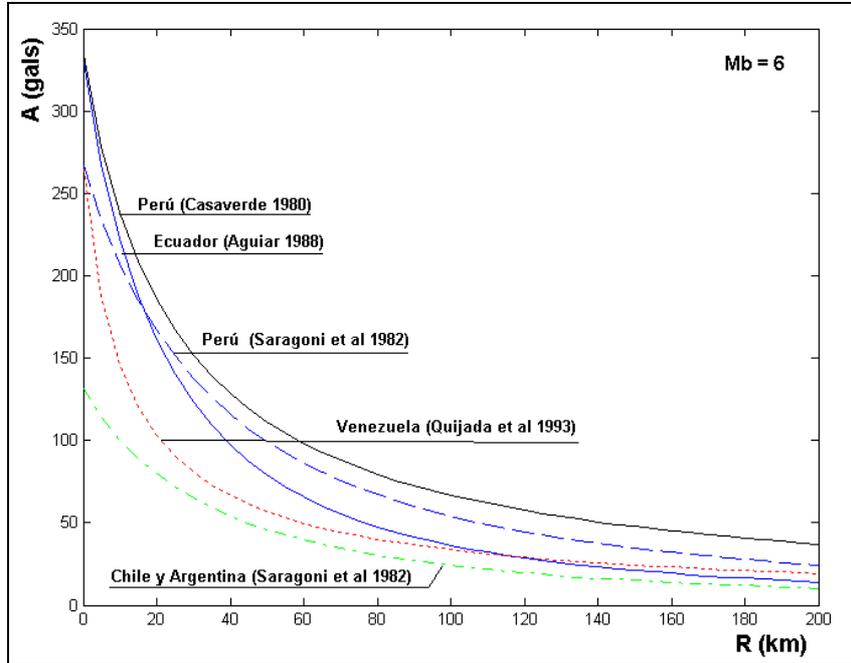


Figura 3 Leyes de atenuación para varios países de Sur América.

Tabla 4 Leyes de atenuación obtenidas con registros sísmicos.

Autor	Ley de atenuación
Boore <i>et al</i> (1993)	$\log Y = b_1 + b_2(M_w - 6) + b_3(M_w - 6)^2 + b_4 D + b_5 \log D + b_6 G_B + b_7 G_C$ <p><i>Y</i> es la aceleración máxima horizontal en unidades de g. $b_1 = -0.136$ Para fallas transcurrentes; $b_1 = -0.051$ Para fallas inversas $b_2 = 0.229$; $b_3 = 0$; $b_4 = 0$; $b_5 = -0.778$; $b_6 = 0.162$; $b_7 = 0.251$; $h = 5.57$; G_B, G_C dependen del tipo de suelo.</p>
Campbell (1993)	$\ln Y = \beta_0 + 0.683M + \beta_1 \tanh[0.647(M - 4.7)] - 1.0 \ln r - \alpha R + 0.27F + [(\beta_2 - 0.105 \ln R)]S + \beta_3 \tanh(0.620 D_h)$ $r = \sqrt{R^2 + [0.0586 * \exp(0.683M)]^2}$ $\alpha = \beta_4 + \beta_5 M$ <p><i>Y</i> es la aceleración máxima horizontal en unidades de g. $M = M_L$ para $M < 6$. $M = M_S$ para $M > 6$ $F = 0$ para fallas transcurrentes; $F = 1$ para fallas inversas. $S = 0$ para suelos cuaternarios; $S = 1$ para depósitos terciarios y para roca α es un coeficiente de atenuación anelástico (km^{-1}). D_h es la profundidad del lecho rocoso.</p>

	Para roca: $\beta_0 = -3.15; \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0; \beta_4 = 0.0150; \beta_5 = -0.000995$
Sadigh et al (1993)	$\ln Y = C_1 + C_2 M_w + C_4 \ln[R + \exp(C_5 + C_6 M_w)]$ <p>Y es la aceleración máxima horizontal en unidades de g. Para Falla Transcurrente y roca con $M_w < 6.5$</p> $\ln Y = -0.624 + 1.0 M_w - 2.1 \ln[R + \exp(1.29649 + 0.250 M_w)]$ <p>Para Falla Transcurrente y roca con $M_w > 6.5$</p> $\ln Y = -1.274 + 1.1 M_w - 2.1 \ln[R + \exp(-0.48451 + 0.524 M_w)]$ <p>Para Fallas inversas se multiplican las Fallas Transcurrentes por 1.2 Para Fallas oblicuas se multiplican las Fallas Transcurrentes por 1.09</p>
Idriss (1993)	$\ln Y = [\alpha_0 + \exp(\alpha_1 + \alpha_2 M)] +$ $[\beta_0 - \exp(\beta_1 + \beta_2 M)] \ln(R + 20) + 0.2 F$ <p>Y es la aceleración máxima horizontal en unidades de g. $M = M_L$ para $M < 6$. $M = M_S$ para $M > 6$ $F = 0$ para fallas transcurrentes; $F = 1$ para inversas; $F = 0.5$ oblicuas Para fallas transcurrentes y roca con $M \leq 6.5$</p> $\ln Y = [-0.15 + \exp(2.261 - 0.083 M)] - \exp(1.602 - 0.142 M) \ln(R + 20)$ <p>Para fallas transcurrentes y roca con $M > 6$</p> $\ln Y = [-0.050 + \exp(3.477 - 0.284 M)] - \exp(2.475 - 0.286 M) \ln(R + 20)$

En la figura 4 también se aprecia una muy buena correlación entre las ecuaciones de Campbell (1993) y de Sadigh et al (1993). Los resultados hallados con la ecuación propuesta por Idriss (1993) también son semejantes. En todas las curvas de la figura 4 no se ha incluido la desviación estandar.

Tabla 5 Leyes de atenuación, para roca utilizadas en Venezuela por Bendito (2001)

Autor	Ley de atenuación
Boore et al (1993)	$\log Y = -0.105 + 0.229(M_w - 6) - 0.778 \log \sqrt{R^2 + 5.57^2} + 0.162$ <p>Y es la aceleración máxima horizontal en unidades de g. $5.0 \leq M_w \leq 7.0$ $R < 100 \text{ km}$</p>
Campbell (1993)	$\ln Y = -3.15 + 0.683M - 1.0 \ln(r) - (0.0150 - 0.000995 M)R - 0.105 \ln R$ <p>Y es la aceleración máxima horizontal en unidades de g. $r = \sqrt{R^2 + [0.0586 * \exp(0.683M)]^2}$ $M = M_L$ para $M < 6$. $M = M_S$ para $M > 6$ $M \geq 4.7$ $R < 300 \text{ km}$</p>

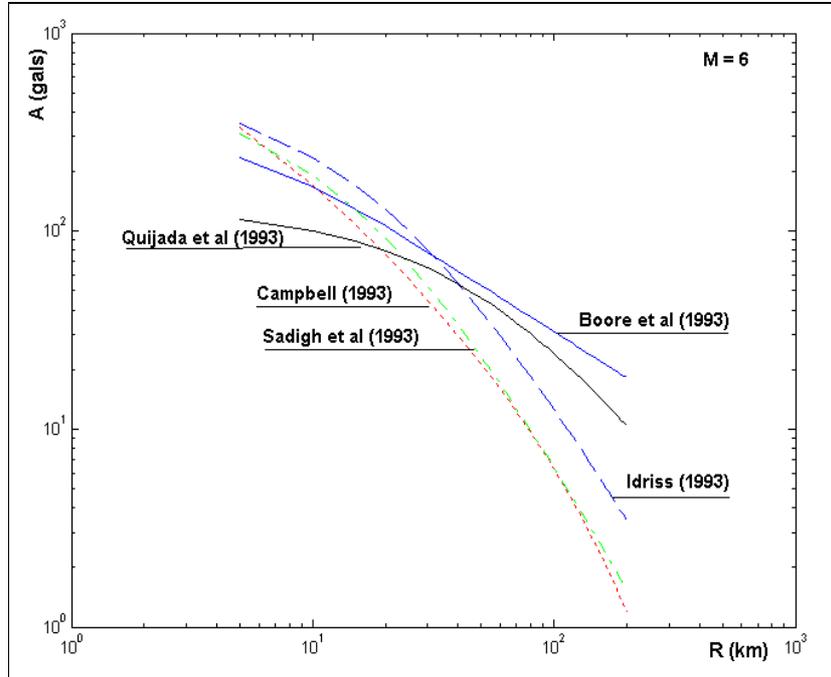


Figura 4 Comparación de leyes de atenuación obtenidas instrumentalmente.

Se destaca que todas las leyes de atenuación, hasta ahora indicadas, son aplicables a zonas fuentes de fallamiento local, no para sismos de subducción.

Para sismos de subducción, Bendito (2001), utilizó la ecuación de Crouse (1991) que fue hallada en la zona de Cascadia en Oregon ya que según este autor estas son parecidas a la subducción de Colombia. La forma de la ecuación general de Crouse (1991) es la siguiente:

$$\ln A_{\max} = p_1 + p_2 M_w + p_3 M_w^2 + p_4 \ln[R + p_5 \exp(p_6 M_w) + p_7 h] \quad (11)$$

Donde M_w es la magnitud de momento; R es la distancia epicentral en km.; h la profundidad focal en km; A_{\max} es la aceleración máxima del suelo en gals. Para determinar la aceleración horizontal máxima del suelo se tiene:

$$\ln A_{\max} = 6.36 + 1.76 M_w - 2.73 \ln(R + 1.58 \exp(0.608 M_w)) + 0.00916 h$$

En la figura 5 se muestra la variación de la aceleración horizontal del suelo, cuando se aplica la ecuación de Crouse (1991) para profundidades focales de 50, 100 y 150 km. Para un sismo de magnitud $M_w = 6$. También se presenta la ley de atenuación de Campbell (1993) para fallamiento cortical, con el propósito de ver la necesidad de contar por lo menos con dos tipos de ley de atenuación, una para ser aplicada en las zonas fuentes asociadas con la subducción y otra para las zonas fuentes de fallamiento local.

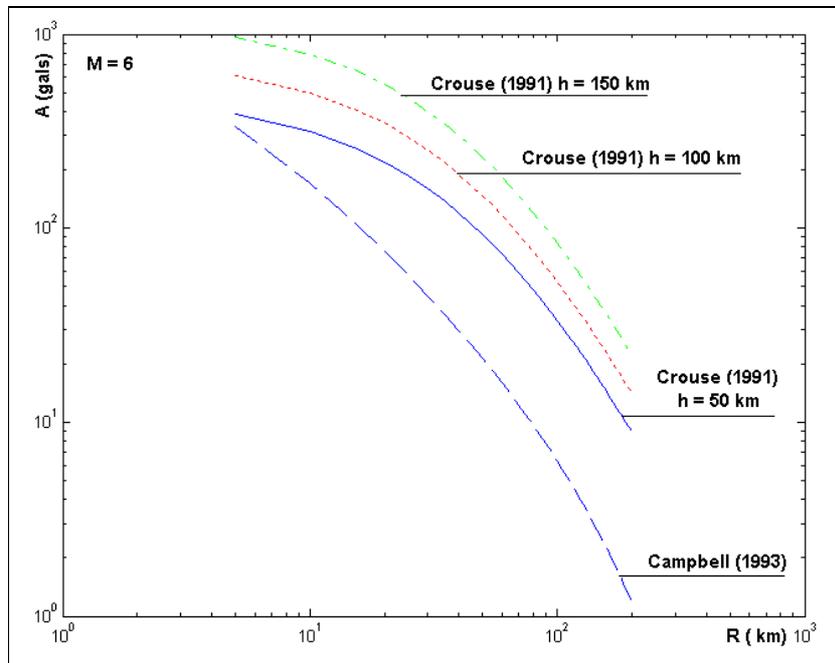


Figura 5 Leyes de atenuación de Crouse para subducción y de Campbell para sismos corticales.

5. DETERMINACIÓN DE LAS LEYES DE ATENUACIÓN DE INTENSIDADES.

En base a 20 curvas isosista correspondientes a 19 sismos ocurridos en el Ecuador y 1 en Colombia se determina, previo a un modelo base de ley de atenuación se procede a determinar la ley que corresponda a un modelo de atenuación de intensidades acordes a las condiciones sísmicas de nuestro país.

$$I = C_1 + C_2 M + C_3 \ln(D + R_0) \quad (12)$$

Donde, I: Intensidad esperada a una intensidad hipocentral D; C_1 , C_2 , C_3 : Se infiere del ajuste con los datos zonales correspondientes.; R_0 : Parámetro empírico que define el campo cercado. La ecuación 12 sirve para isosistas cerradas, en caso de las isosistas abiertas se hará una relación de ángulos.

La gran mayoría de las isosistas utilizadas en este estudio fueron tomadas de varios aytores que han realizado mapas de isosistas en el Ecuador uno de los cuales es (1988, 1999, 2009) quien recopila la información existente acerca de los principales terremotos en el Ecuador, así como también se utilizaron isosistas que constan en el estudio de peligrosidad sísmica desarrollado para el Proyecto Hidroeléctrico Coca-Codo Sinclair. Pasquaré G., (1988). A continuación en las siguientes gráficas presentamos las diferentes isosistas utilizadas para este estudio:

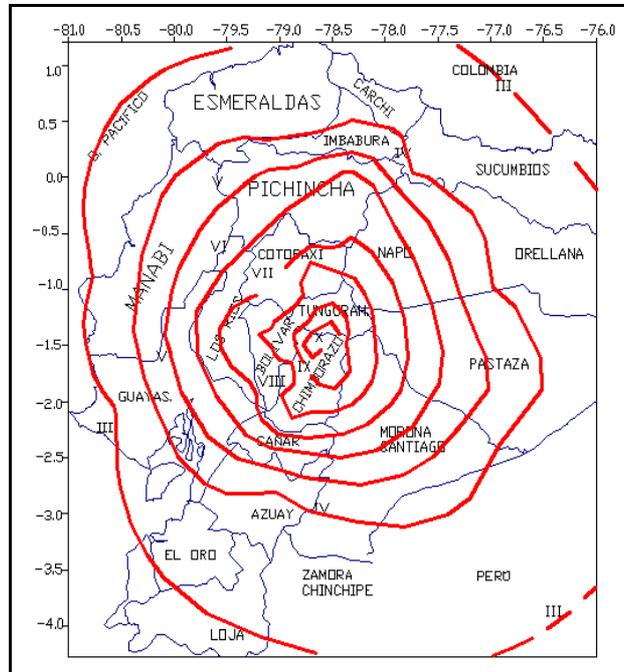


Figura 6 Isosistas del Sismo de Riobamba 1797. FUENTE EGRED(1999)

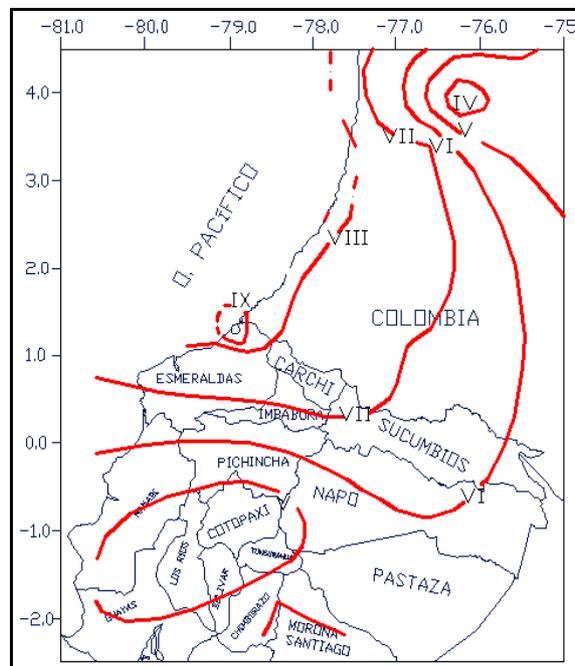


Figura 7 Isosistas del Sismo de Esmeraldas 1906. FUENTE EGRED 1999

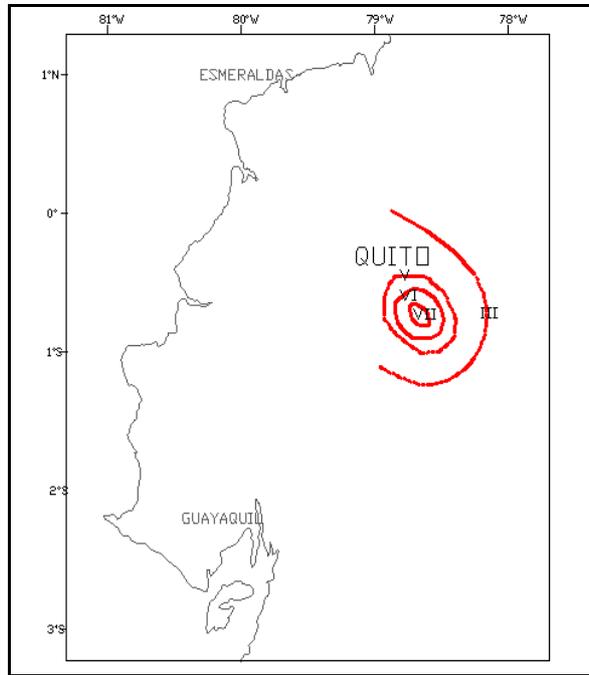


Figura 8 Isosistas del Sismo de Pasto Calle 1944. FUENTE EGRED

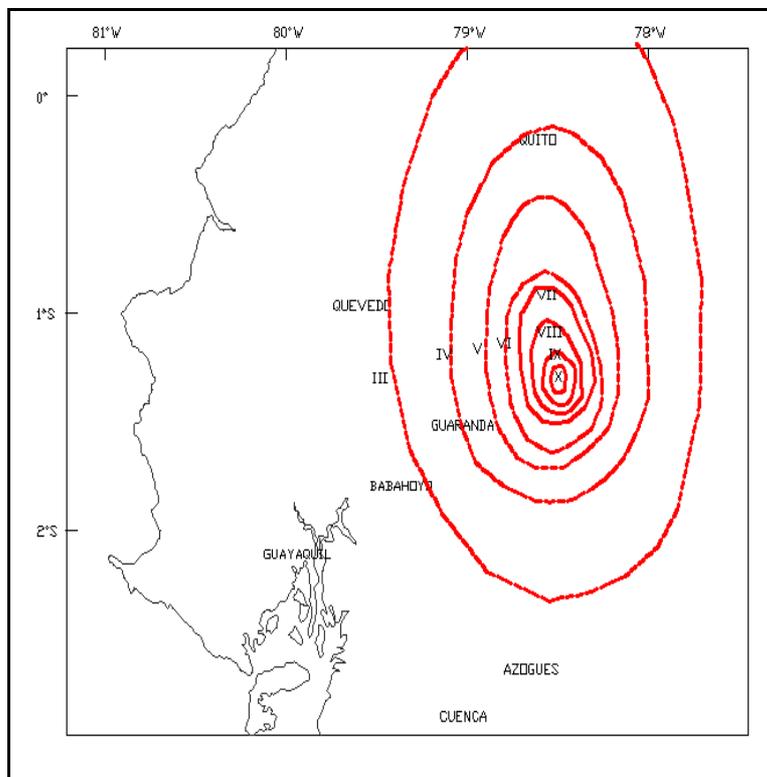


Figura 9 Isosistas del Sismo de Pelileo 1948. FUENTE EGRED

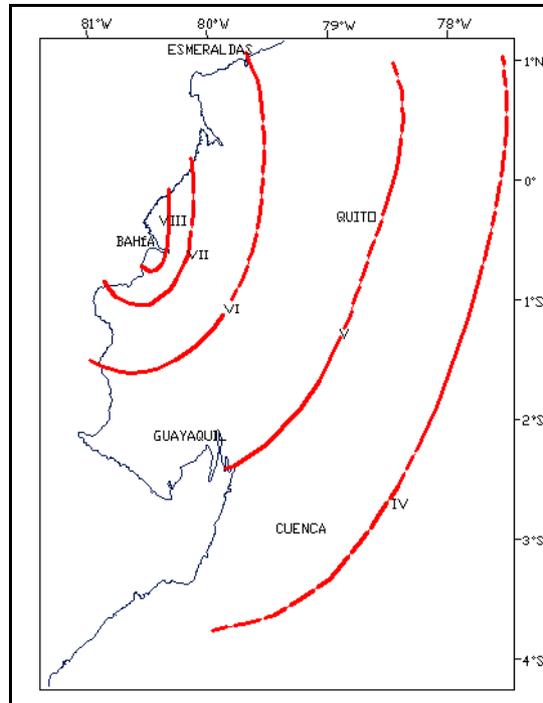


Figura 10 Isosistas del Sismo de Bahía de Caráquez 1956. FUENTE EGRED

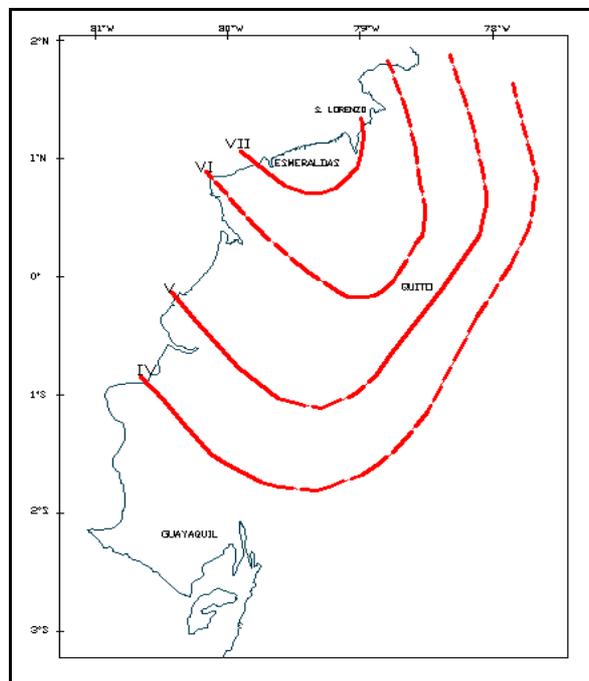


Figura 11 Isosistas del Sismo de Bahía 1958. FUENTE EGRED

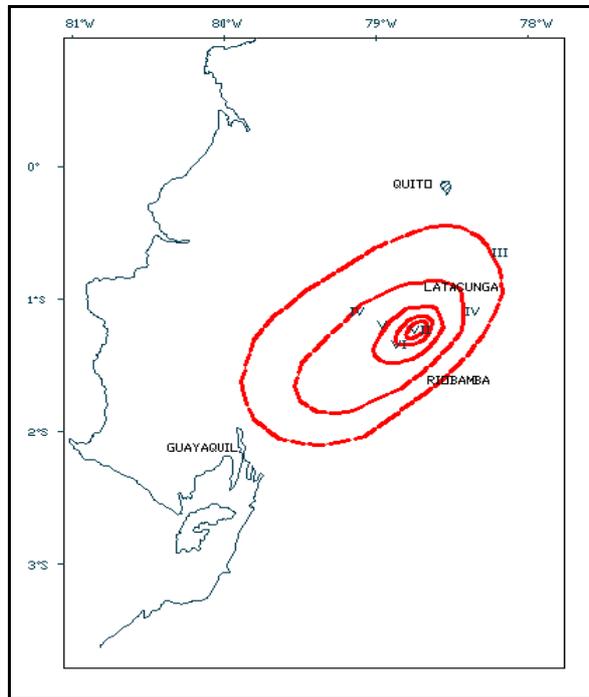


Figura 12 Isosistas del Sismo de Pasa 1960. FUENTE EGRED

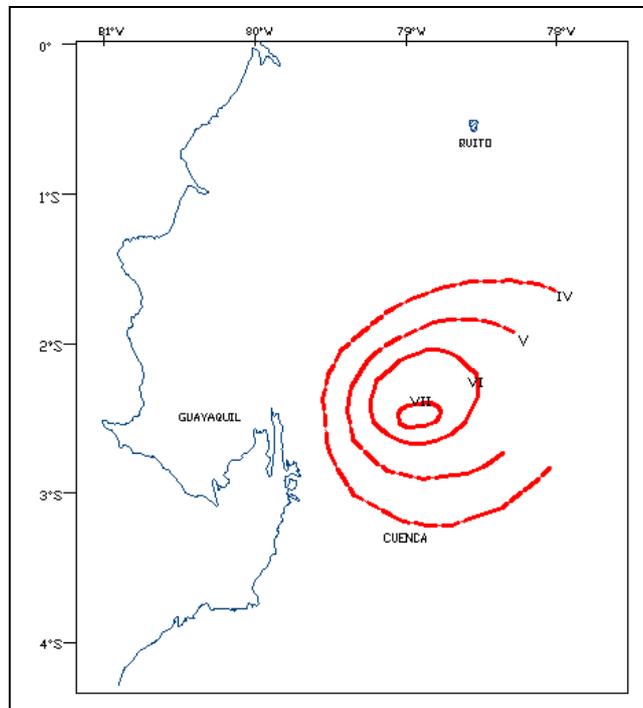


Figura 13 Isosistas del Sismo de Alausí 1961. FUENTE EGRED

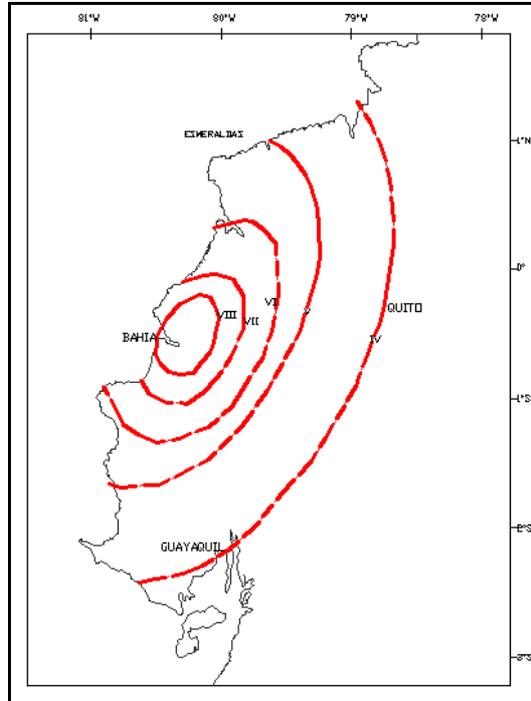


Figura 14 Isosistas del Sismo de Bahía 1964. FUENTE EGRED

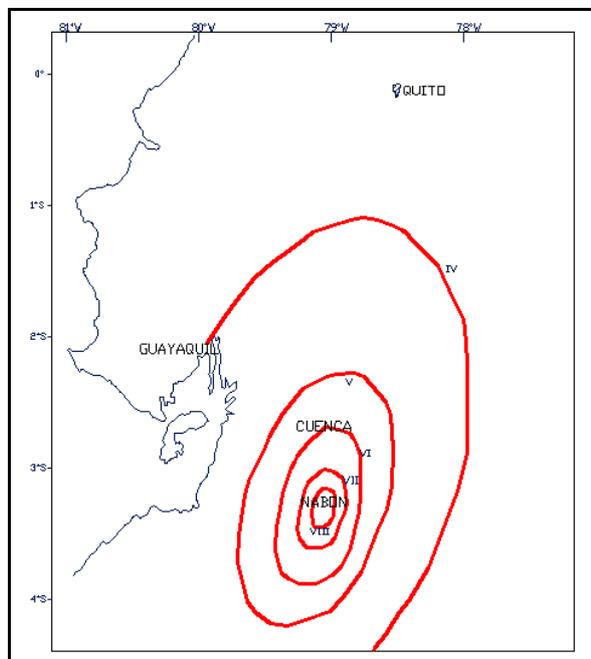


Figura 15 Isosistas del Sismo de Nabón 1966. FUENTE EGRED

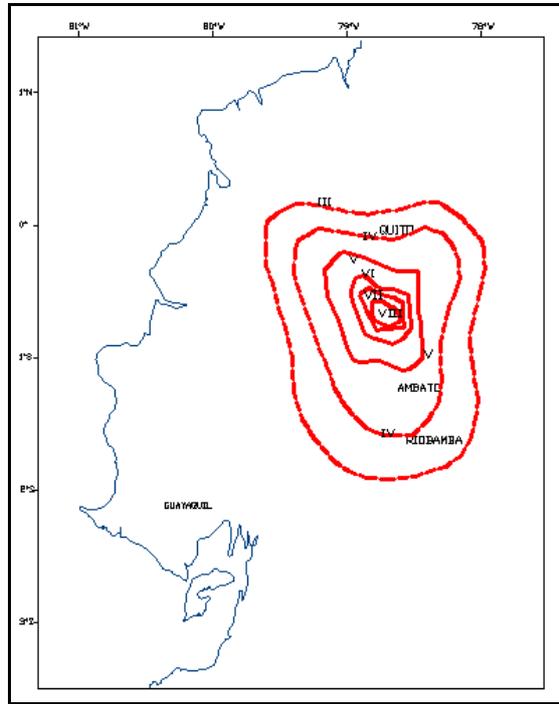


Figura 16 Isosistas del Sismo de Pastocalle 1976. FUENTE EGRED

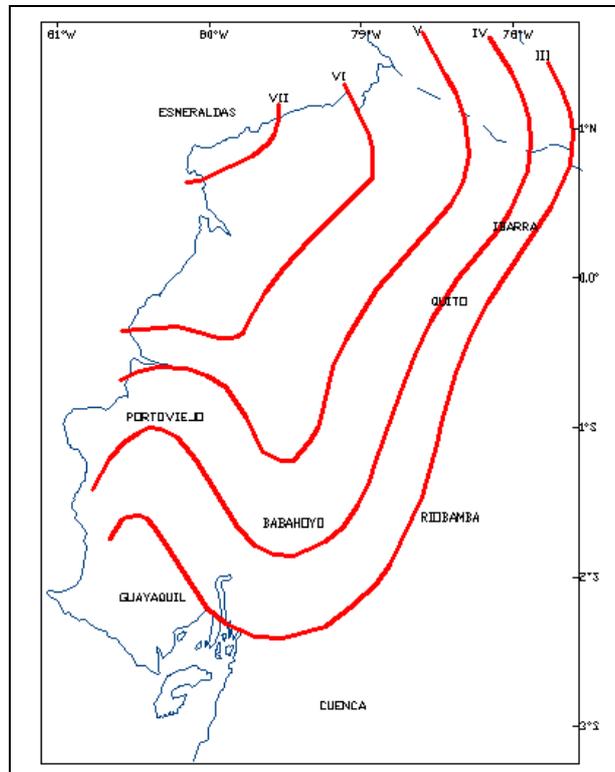


Figura 17 Isosistas del Sismo de Esmeraldas 1976. FUENTE EGRED

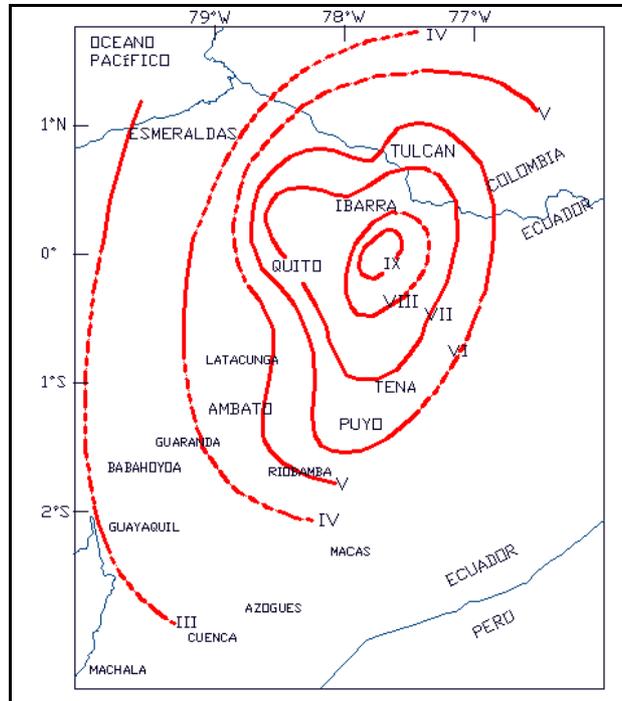


Figura 18 Isosistas del Sismo de Baeza 1987. FUENTE EGRED

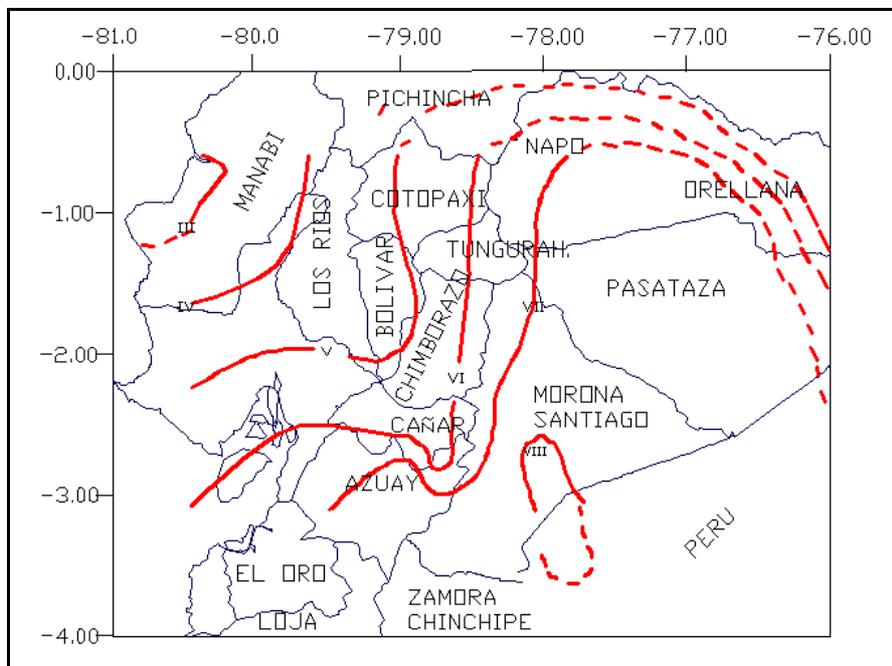


Figura 19 Isosistas del Sismo de Macas 1995. FUENTE EGRED(1999)

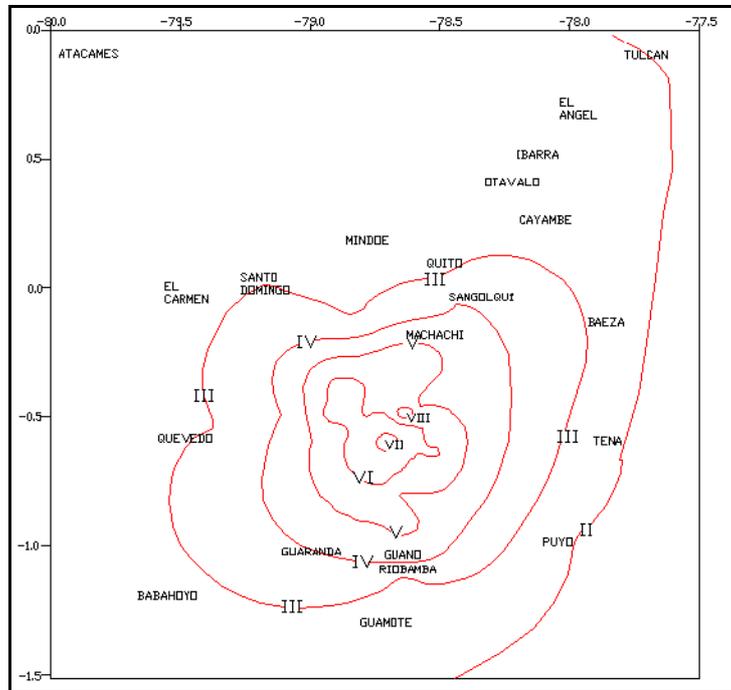


Figura 20 Isosistas del Sismo de Pujilí 1996.

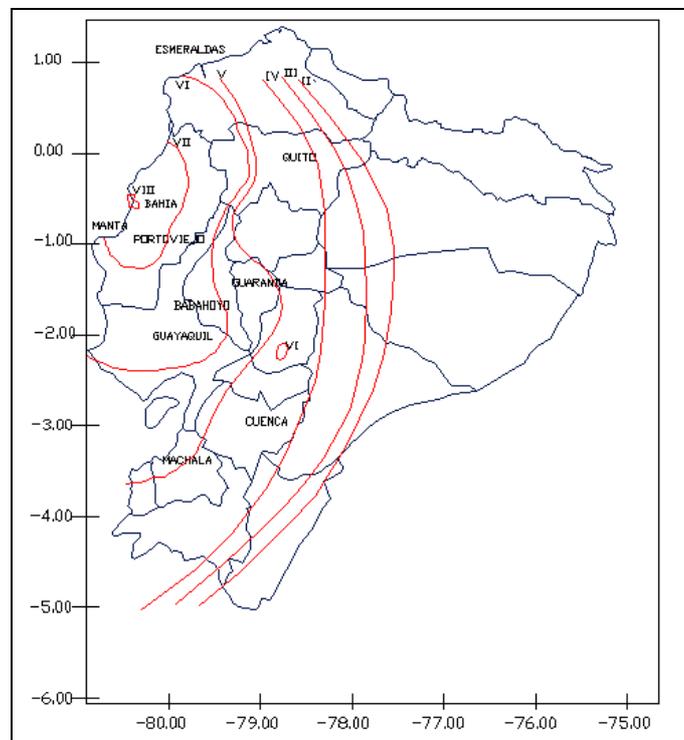


Figura 21: Isosistas del Sismo de Bahía 1998.

En base a los valores de R_i y los hipocentros de cada uno de los sismos se determinan los valores de D . tal como se muestra en la tabla 6 de este apartado.

Tabla 6 Valores de D para cada Intensidad de isosistas

#	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	ALAUÍS	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

Se determinan los valores que exige la ecuación modelo para obtener finalmente la fórmula de la ley de atenuación. En Castro (2009), se presenta este cálculo de forma más detallada. Como el objetivo es minimizar error en el cálculo, planteamos la siguiente ecuación:

$$e(C_1, C_2, C_3) = \sum_{I=1}^n \{I_i - [C_1 + C_2 M + C_3 \ln(D + R_o)]\}^2 \tag{13}$$

En la cual n equivale al número de puntos que se analizan y e es el error. En base a esta ecuación se obtienen los valores de los datos zonales correspondientes, encontrados a partir de un sistema de ecuaciones lineales que se describen con mayor detenimiento en Castro (2009). Obteniendo de esta forma los siguientes resultados:

$$C_1 = 3.3577$$

$$C_2 = 1.0013$$

$$C_3 = -0.8856$$

Reemplazando los resultados en la ecuación 12 que es nuestra ecuación modelo tenemos que:

$$I_i = 3.3577 + 1.0013M_w - 0.8856 \ln(D + 10) \quad (14)$$

La ecuación 14 representa la variación de la intensidad en función de la magnitud, para determinar la variación de la aceleración máxima del suelo en función de la magnitud se reemplazan los valores en la ecuación 2 y se toman los valores de σ y de γ utilizados por Saragoni(1982) los cuales se detallan en la tabla 1, los mismos que han sido utilizados en los estudios de Aguiar (1989) y Palacio (1987).

En base a esta nueva información se obtuvo la nueva ley de atenuación en base a datos sísmicos de nuestro país, tal como se define a continuación:

$$A_{MAX} = e^{2.197 + 0.807M_w - 0.714(\ln(D+10))} \quad (15)$$

6. SELECCIÓN DE LEYES DE ATENUACIÓN.

Una vez estudiadas las diferentes leyes de atenuación para zonas de fallamiento local y zonas de subducción se realiza un análisis comparativo de las leyes estudiadas en América del sur y la ley obtenida en este estudio.

En la figura 6 se detallan las curvas de las leyes de atenuación en función de las aceleraciones máximas del suelo con una magnitud $M_b=7$. En esta figura se particularizan las curvas obtenidas mediante ecuaciones obtenidas en base a isosistas las mismas que son comparadas con el modelo alcanzado para este estudio.

En la figura 7, las curvas que se detallan representan a las leyes obtenidas instrumentalmente, a excepción de la curva determinada por Aguiar Castro (2009), puesto que este estudio fue realizado por medio de isosistas, sin embargo notamos que la tendencia de esta curva se asemeja a la propuesta por Boore et al (1993), la cual fue utilizada en Venezuela por Bendito (2001) para las condiciones de suelo roca.

Se determina que debido a que las comparaciones de las curvas de Aguiar, Castro (2009) y las determinadas mediante estudio de isosistas en América del Sur cumplen con una tendencia y se podría decir que son similares, en base a este análisis la ley obtenida en este estudio es aplicable para la determinación de la Peligrosidad Sísmica.

En base a la comparación de la Figura 23 se aprecia que las leyes obtenidas por Boore et al (1993) para roca de forma instrumental y la ley obtenida en este proyecto tienen de igual manera una tendencia similar. Hay que recalcar que la Ley de Boore et al (1993) y la ley de Aguiar Castro (2009), son leyes propias para un período estructural igual a 0 el mismo que corresponde a suelo roca.

Para leyes de atenuación en el caso de Subducción se trabajará con la ecuación propuesta por Crouce (1991), debido a que se emplea para zonas de Subducción en Colombia, las cuales tienen un similitud con las zonas de Subducción de Ecuador.

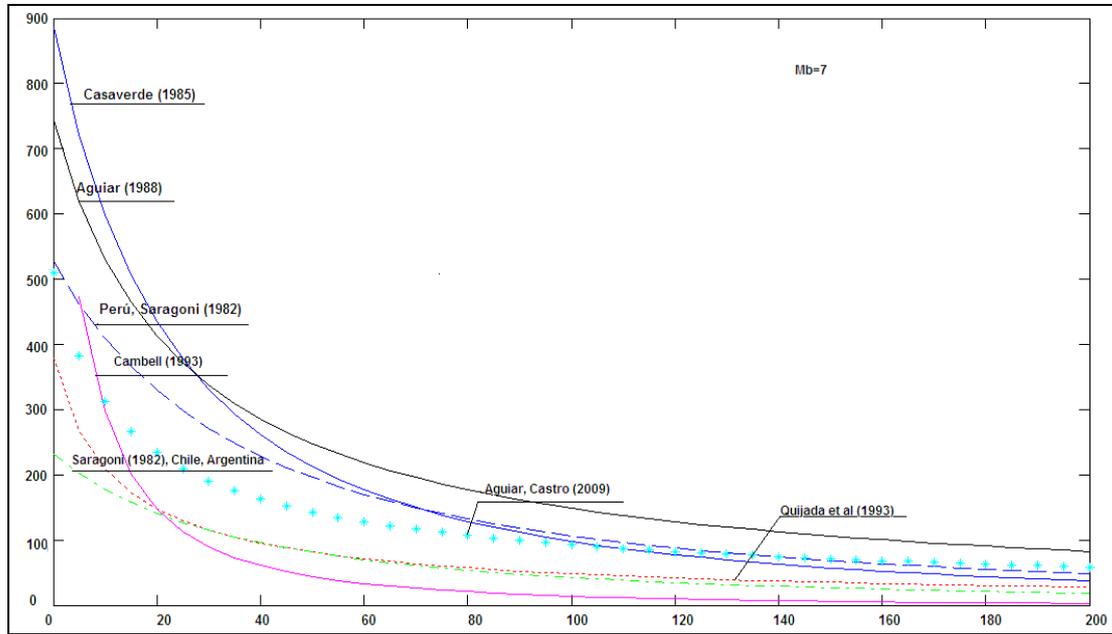


Figura 22 Leyes de Atenuación para América del Sur.

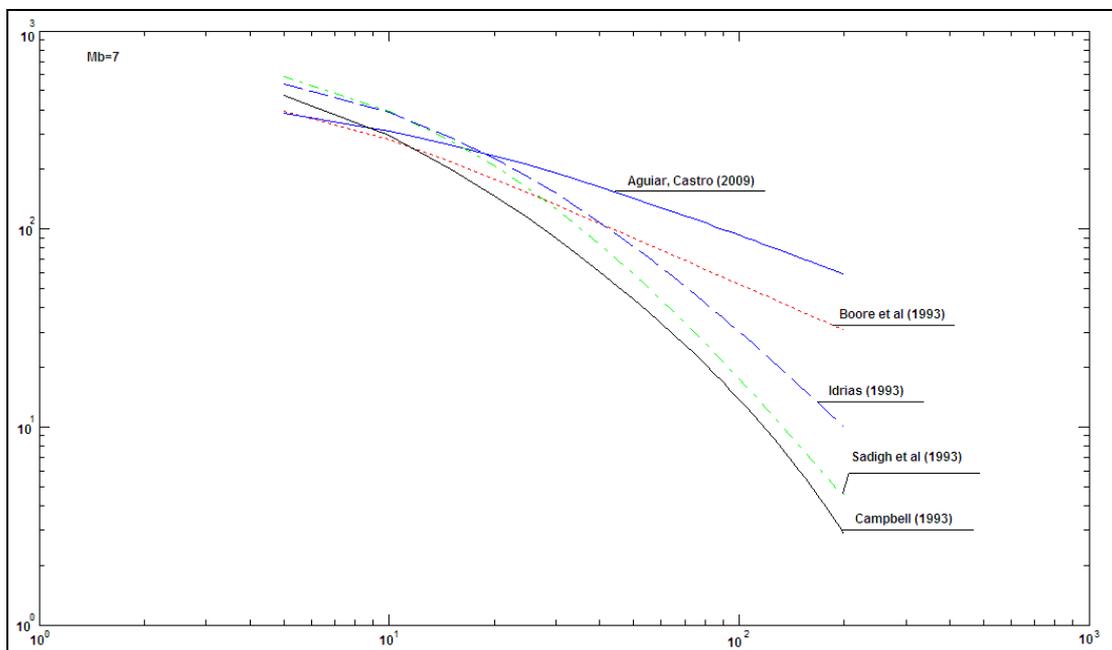


Figura 23 Comparación de curvas obtenidas instrumentalmente..

7. Conclusiones

- La carencia de registros sísmicos dificulta la obtención de las leyes atenuación, lo que obliga la utilización de las intensidades en la escala de Mercalli, misma que no es suficientemente confiable.
- Para algunos casos autores que determinan leyes de atenuación en América del Sur sugieren varios modelos de ley de atenuación en función de aceleración del suelo debido a que las condiciones sísmicas son distintas en cada región.
- Se elaboró una ley de atenuación para nuestro país en base a 20 isosistas que representan sismos que causaron gran daño en las estructuras del Ecuador, la misma que fue comparada con otras leyes elaboradas en América del Sur y como resultado se obtuvo que la ley de este estudio tenía una similar tendencia a estas.
- Se determinó la ley de Crouse(1991) para la zona de subducción de Ecuador debido a que esta fue utilizada en para la zona de subducción de Colombia, la misma que es similar a la zona de subducción de Ecuador.

REFERENCIAS

1. Aguiar R., (1982), *Cuantificación de la amenaza sísmica del Ecuador en términos probabilísticos y mapa de zonificación*. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Central de Venezuela, 179 p., más planos. Caracas.
2. Aguiar R., (1988), "Leyes de atenuación, una contribución a la zonificación sísmica del Ecuador", *IV Encuentro Nacional de Ingeniería Estructural. Politécnica del Ejército*, 364-379, Quito.
3. Bendito A., (2001), *Análisis de sismicidad y curvas de isoaceleración para estados de desempeño estructural en el Occidente Venezolano*, Tesis de Maestría en Ingeniería Estructural, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.
4. Bendito A., Rivero P. y Lobo W., (2001), "Curvas e isoaceleración para estados de desempeño estructural en el Occidente Venezolano", *Boletín Técnico del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales IMME. Universidad Central e Venezuela*, **39 (2)**, 1-18, Caracas, Venezuela.
5. Boore D., Joyner W., Fumal T-. (1993), "Estimation of response and Peak accelerations from western north american earthquakes", *U.S. Geological Survey Open File, Report 93-509*, 72 p., EZ-FRISK™ Attenuation Equation References.
6. Campbell M., Kenneth (1993), "Empirical prediction of near source ground motion from large earthquakes", EZ-FRISK™ Attenuation Equation References.
7. Crouse C., (1991), "Ground-motion attenuation equations for earthquakes on the Cascadia subduction zone", *Earthquake Spectra*, **Vol 7, N.- 2**.
8. Gallego M., (2000), *Estimación del riesgo sísmico en la República de Colombia*, Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México, 108 p., México.
9. Castro C., (2009), *Determinación de la peligrosidad sísmica del Ecuador en base a curvas de isoaceleración*, Tesis de Grado para obtener el título de Ing. Civil. Escuela Politécnica del Ejército.
10. Gómez A., Salcedo E., "Leyes de atenuación de la Intensidad Macrosísmica en Colombia",
11. Grases J., (1980), *Investigación sobre los sismos destructores que han afectado al Centro y Occidente de Venezuela*, Proyecto INTEVEP, Caracas, Venezuela.
12. Howel H., y Schultz T., (1975), "Attenuation of modified Mercalli Intensity with distance from the epicenter", *Bulletin of Seismological Society of America*, **62 (3)**, 651-665.
13. Idriss I., (1993), "Procedure for selecting earthquakes ground motion at rock sites", EZ-FRISK™ Attenuation Equation References.

14. Joyner W., y Boore D., (1981) "Peak horizontal acceleration and velocity from Sorong-motion records including records from the Imperial Valley, California, earthquakes, *Bulletin of Seismological Society of America*, **71**, 2011-2038.
15. Kovesligethy R., (1907), "Seismischer Starkegrad und Intensitat der Beben", *Gerlands Beitrage zur Geophysik*, Band **VIII**, Leipzig.
16. Lomnitz C., (1974), "Global tectonics and earthquake risk", *Elsevier Scientific Publishing Company*.
17. McGuire R., (1976) *Fortran Computer Program for seismic risk analysis*, United States Department of the Interior Geological Survey.
18. McGuire R., (1978) "Seismic ground motion parameter relations", *Journal of the Geotechnical Division, ASCE*, Vol **104**, **GT4**, 481-490.
19. Medvedev A., Sponheur W., (1969), "Scale of seismic intensity", *Proc. World Conf. Conf. Earthquake Eng. 4th* Santiago de Chile.
20. Miranda E., (1999), "Respuesta de edificios al movimiento sísmico", *Curso sobre diseño y construcción Sismo Resistente de Estructuras. CENAPRED*, 41-61, Distrito Federal, México.
21. 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**.
22. Ordaz M., Jara J., Singh S. (1989), *Riesgo sísmico y espectros de diseño en el Estado de Guerrero*. Informe Interno 8782/9745 Instituto de Ingeniería. UNAM y el Centro de Investigación Sísmica, AC., México.
23. Ordaz M., (1999), "Sismicidad y Riesgo Sísmico", *Curso sobre diseño y construcción Sismo Resistente de Estructuras. CENAPRED*, 19-38, Distrito Federal, México.
24. Pasquaré G., (1988), *Sismología y Tectónica*, Proyecto Hidroeléctrico Coca-Codo Sinclair. Anexo H. INECEL Instituto Ecuatoriano de Electrificación, 152 p., más anexos, Quito, Ecuador.
25. Pérez A., Jaimes M., y Ordaz M., (2009), "Spectral attenuation relations at soft sites base don existing attenuation relations for rock sites", *Journal of Earthquake Engineering*, **13**, 236-251.
26. Quijada P., Gajardo E., Franke M., Kozuch J., Grases J., (1993), "Análisis de amenaza sísmica de Venezuela para el nuevo mapa de zonificación con fines de Ingeniería", *Memorias del VIII Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismo Resistente*, Merida, Venezuela.
27. Sadigh K., Chang C., Abrahamson N., (1993), "Specification of long-period ground motion, updated attenuation relationships for rock site conditions and adjustment factor for near-fault effects", *EZ-FRISK™ Attenuation Equation References*.
28. Saragoni R., Crempien J., y Ayala R., (1982), "Características experimentales de los movimientos sísmicos sudamericanos", *Revista del IDIEM*, **21 (2)**, 67-86, México.
29. Saragoni R. (1980), "Características de los movimientos sísmicos latinoamericanos y su influencia en el diseño sísmico de la región andina", *Revista del Centro de Ingenieros, Arquitectos y Agrimensores de Mendoza*, **60**, Argentina.
30. Shebalin N., (1968) "Método de utilización de datos ingeniero-geológicos en la zonificación sísmica de la URSS", *Nauka*, 95-111.
31. Sponheur W. (1960), *Methoden zur Herdtiefenbestimmung in der Makroseismik* (Methods for depths estimation in macroseismic), *Freiberger Forschungs-Hefte* **C-88**, 117 p., Akademie Verlag Berlin.

ESTUDIO COMPARATIVO DE LA CONSTRUCCIÓN EN ACERO RESPECTO AL HORMIGÓN ARMADO EN SISTEMAS ESTRUCTURALES DE OCHO PISOS

Christian Garzón Chalco y Wilman Yanchatuña

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica
Escuela Politécnica del Ejército
christiangc2e@yahoo.com

RESUMEN

El acero como material alternativo en la construcción de edificios ha sido considerado en los últimos años en el Ecuador, la necesidad de conocer las ventajas económicas y estructurales respecto al hormigón armado son el principal objetivo de este trabajo que se presenta. El alto grado de sismicidad que presenta el Ecuador hace necesario que el diseño sismo resistente sea primordial en los edificios de varios pisos, a través de un análisis matricial de estructuras se obtiene las respectivas fuerzas estáticas equivalentes a las del sismo raro del CEC2000. Se realiza dos tipos de análisis el primero en función de la deriva de piso y el segundo en función de la demanda capacidad de los elementos estructurales de acero. El análisis del sistema estructural de hormigón armado en función de la deriva de piso es el que se propuso en el trabajo que se presenta. La comparación estructural entre ambos sistemas estructurales es el resultado final del análisis estructural de este trabajo.

ABSTRACT

Steel as an alternative material in the building constructions have been considered in the last years in Ecuador, the necessity of knowing the economic and structural advantages about concrete are the principal goal of this article. The high degree of seismic activity that in Ecuador occurs makes necessary that the seismic design is primordial in buildings. A matrix structural analysis in order to get the static forces of CEC2000 rare seismic is applicable in this work. In this article there are two types of analysis, the first is about the drift and the second is about the Demand Capacity of the structural elements of steel. The structural concrete system has a drift analysis which is the propose of this work. The structural comparison between both systems is the final result of this work which is presented.

1. INTRODUCCIÓN

La reciente gran acogida de los sistemas estructurales de acero en el Ecuador, ha hecho que se presente ciertas incógnitas comparativas con su par de hormigón armado, el cual por muchos años ha sido la única alternativa constructiva. En los países industrializados, como los Estados Unidos, la construcción de edificios de acero se viene dando desde el año de 1920, con la construcción de grandes edificios metálicos, esto debido a la producción de acero en este país, lo que ha dado como resultado que prácticamente una gran mayoría de los edificios de este material sean preferidos. Los criterios estructurales que se utilizan para los edificios de hormigón armado también son utilizados para los edificios de acero, especialmente conceptos de mecánica de materiales, ingeniería estructural y

como una parte fundamental y muy importante la tecnología de soldadura. Las consideraciones de diseño sísmico incluyen la utilización del espectro inelástico de diseño del CEC2000, el cual permite obtener las aceleraciones de diseño para posteriormente con un análisis modal espacial de la estructura poder hallar las fuerzas estáticas equivalentes del sismo. En los últimos años en el Ecuador se está innovando con la elección del acero como material alternativo para la construcción de edificios, el mejorar las condiciones de construcción, abaratar los costos, recuperar la inversión de forma pronta, son las razones fundamentales por las cuales se está prefiriendo al acero en la construcción de edificios de varios pisos.

2. MARCO TEÓRICO

Se considera un sistema estructural de ocho pisos, el mismo que se diseña en acero y en hormigón armado sin muros de corte. La primera planta consta de una altura de 4.0 m, y los siguientes pisos de 3.5 m, se consideran cuatro vanos de 5 m cada uno en los dos planos ortogonales verticales.

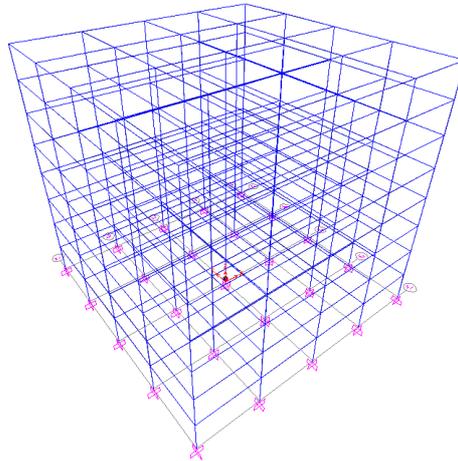


Figura 1.- Esquema del sistema estructural de ocho pisos

2.1 Obtención de las Fuerzas Sísmicas estáticas equivalentes del sismo

Para la obtención de las fuerzas sísmicas estáticas equivalentes se realiza un análisis modal espacial, obteniéndose previamente la matriz de rigidez de la estructura, a través del programa rlxinfi. (Aguiar, 2007, 2008), en el cual se introduce como datos las propiedades geométricas de columnas y vigas, además de su longitud, el módulo de elasticidad del material, el número de pisos y el número de nudos restringidos.

Se calcula la matriz de rigidez en coordenadas de piso, a través de la formula, (Aguiar, 2004):

$$K_e = \sum_{i=1}^{NP} A^{(i)T} * K_L * A^{(i)} \quad (1)$$

Donde: K_e es la matriz de rigidez de la estructura en coordenadas de piso; A es la matriz de compatibilidad de deformaciones; K_L es la matriz de rigidez lateral de pórtico; NP es el número de pisos de la estructura.

A través del programa modalespacial3GDLnew.m (Aguiar, 2008) se realiza un análisis modal espacial con 3 grados de libertad por planta, y considerando la losa como piso rígido (Aguiar 2008). En este programa se introduce como datos la matriz de rigidez de la estructura (KL), la altura acumulada de cada piso (alt), la distancia desde el centro de masas hacia cada pórtico (r), el peso de la estructura (pesoD) y la carga viva de la misma (pesoL), con estos datos el programa calcula las fuerzas sísmicas equivalentes del sismo raro del CEC2000, además genera un control P-Delta, el cortante basal, la deriva de piso y el índice de estabilidad de piso, con sus respectivos análisis de reforzamiento de la estructura de ser el caso.

2.2 Sistema Estructural de Acero

Se realiza el diseño del Sistema estructural de acero según la relación demanda capacidad de los perfiles estructurales (ANSI/AISC 360-05, 2005).

El acero seleccionado para el sistema estructural es ASTM A992 con una resistencia a la fluencia de 50 ksi y una resistencia última de 65 ksi (ANSI/AISC 360-05, 2005).

Las columnas y vigas son las siguientes:

Tabla 1.- Cuadro de perfiles estructurales del sistema estructural

Piso	Columnas	Vigas
1	W14X159	W16X50
2	W14X159	W16X50
3	W14X132	W16X45
4	W14X132	W16X45
5	W14X132	W16X45
6	W14X82	W16X40
7	W14X82	W16X40
8	W14X82	W16X40

Para el sistema de piso se utiliza los perfiles W8X10, los mismos que son direccionados de forma perpendicular a las costillas del deck (AISC, LRFD Manual 2005).

El sismo puede darse ya sea en sentido X o en sentido Y, para equilibrar las inercias de las columnas se establece la siguiente posición:

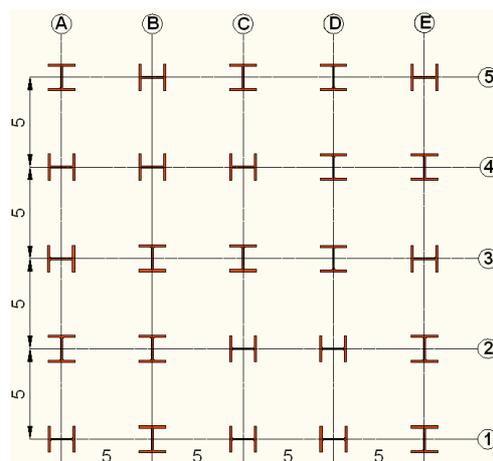


Figura 2.- Distribución de los perfiles Wide Shape utilizados como columnas

En cada eje se encuentran inercias fuertes y débiles haciendo que el sistema estructural se encuentre equilibrado para que cuando ocurra un sismo en cualquier dirección éste sea resistido por las inercias fuertes en su mayoría en cada uno de las direcciones antes mencionadas, cabe recalcar que el valor del factor de reducción de las fuerzas sísmicas es de 6, (Aguar 2007). Los valores de las fuerzas sísmicas equivalentes que reporta el programa modalespacial3GDLnew.m son:

Tabla 2.- Fuerzas laterales de sismo en sentido X, (toneladas)

Piso	Pórtico 1	Pórtico 2	Pórtico 3	Pórtico 4	Pórtico 5
1	5,68	1,34	3,54	5,92	2,63
2	3,21	4,19	3,69	3,11	3,91
3	4,02	3,65	3,31	4,16	3,55
4	2,57	1,23	1,68	2,77	1,49
5	1,28	4,31	5,95	1,34	4,95
6	4,61	3,44	3,26	4,85	3,48
7	7,03	6,26	5,59	7,28	6,07
8	14,59	14,21	10,19	15,93	12,44

Tabla 3.- Fuerzas laterales de sismo en sentido Y, (toneladas)

Piso	Pórtico A	Pórtico B	Pórtico C	Pórtico D	Pórtico E
1	2,50	5,52	2,06	4,83	4,50
2	3,98	3,26	4,07	3,42	3,53
3	3,52	4,10	3,38	3,98	3,91
4	1,43	2,59	1,32	2,33	2,13
5	5,35	3,32	6,25	1,64	2,62
6	3,39	4,66	3,21	4,37	4,23
7	6,05	7,23	5,80	6,98	6,80
8	12,16	15,46	11,25	14,84	14,09

Tabla 4.- Resumen de los datos obtenidos a través del programa modalespacial3GDLnew.m.

Piso	Sentido X		Sentido Y	
	Deriva de piso	Desplazamientos inelásticos en centro de masas (m)	Deriva de piso	Desplazamientos inelásticos en centro de masas (m)
1	0,0128	0,0512	0,0127	0,0506
2	0,0183	0,1154	0,0182	0,1144
3	0,0194	0,1831	0,0192	0,1818
4	0,0184	0,2474	0,0183	0,2457
5	0,0174	0,3082	0,0173	0,3061
6	0,0214	0,3832	0,0209	0,3792

7	0,0189	0,4494	0,0183	0,4433
8	0,0128	0,4942	0,0124	0,4867

En lo que respecta al diagrama de momentos debido a cargas gravitacionales éste es simétrico, ya que se trata de una estructura simétrica en los dos ejes coordenados, como lo indica la figura 4.

Es evidente que a pesar de tener una estructura simétrica en ambos ejes coordenados, la disposición de los perfiles estructurales hace que el diagrama de momentos de la figura 5 no sea simétrico, ya que se encuentran inercias fuertes y débiles en el mismo pórtico analizado.

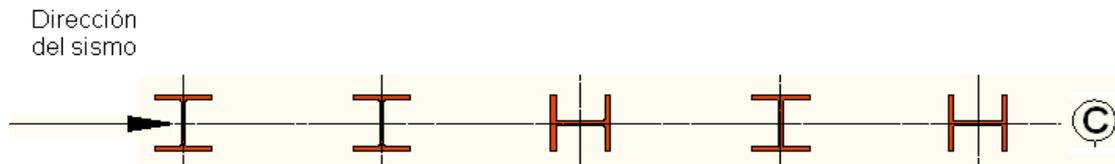


Figura 3.- Dirección Y del sismo sobre el pórtico central

Como se observa en la figura 3 en la dirección del sismo existen 3 inercias débiles y 2 inercias fuertes dando como resultado el diagrama de la figura 5.

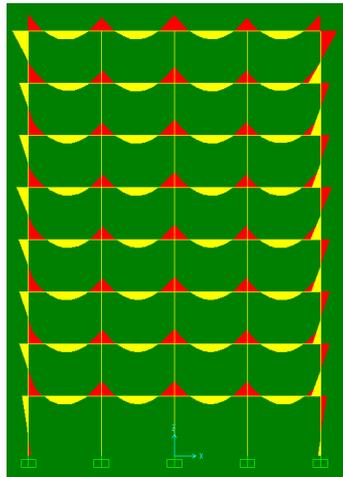


Figura 4.- Diagrama de momentos causados por cargas gravitacionales del pórtico central

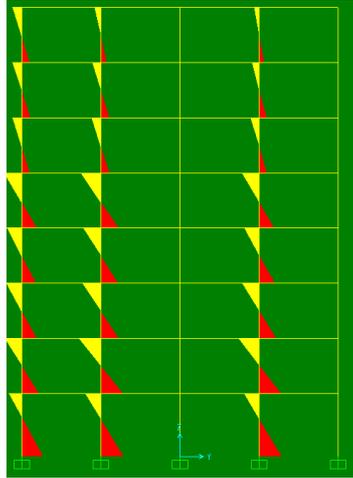


Figura 5.- Diagrama de momentos causados por cargas de sismo del pórtico central de la estructura

Con las solicitaciones de momento y de cortante se empieza el análisis y el diseño del sistema estructural de acero, se tiene como base las Specifications for Structural Steel Buildings, of American Institute of Steel Construction, (ANSI/AISC 360-05, 2005).

Se realiza un análisis de esbeltez bajo condiciones sísmicas (ANSI/AISC 341-05, 2005), de los elementos estructurales utilizados como vigas y columnas.

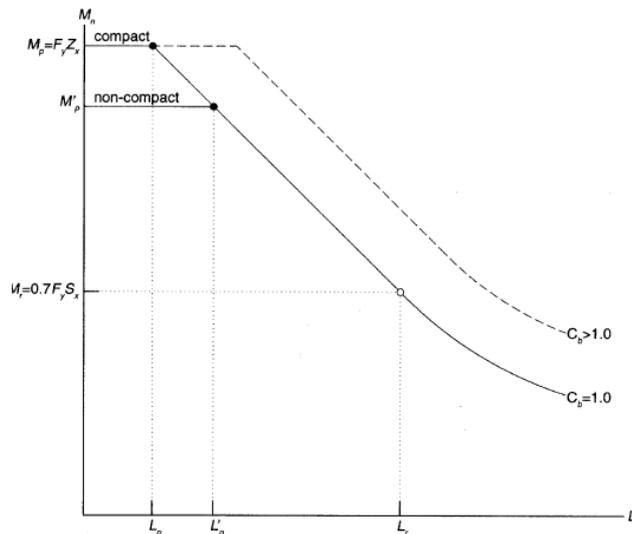


Figura 6.- Diagrama Momento-Soporte lateral adecuado

Cuando el perfil se encuentra dentro de la zona compacta se puede alcanzar la plastificación del acero, en la figura 6, (AISC, LRFD Manual, 2005), se observa las zonas compacta, no compacta y esbelta para un perfil estructural de acero (ANSI/AISC 360-05, 2005). Un perfil estructural es compacto cuando:

$$L_b \leq L_p$$

$$L_p = 1.76 * r_y * \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2)$$

Donde: L_b : Es la longitud sin soporte lateral adecuado; L_p es el punto límite de zona compacta; r_y es el radio de giro del perfil estructural; E es el módulo de elasticidad del acero; F_y es el límite de fluencia del acero.

Con la plastificación del acero se consigue un aprovechamiento total de las propiedades de ductilidad de este material (Vinnakota, 2006), y el momento de diseño será:

$$M_p = F_y * Z \quad (3)$$

Donde: M_p es el momento plástico de diseño; Z es el módulo de sección plástico.

El diseñar en acero en base del momento de plastificación es el principio de diseño del LRFD (Load Resistance and Factor Design, ANSI/AISC 360-05, 2005).

Se realiza un análisis de demanda capacidad de vigas, considerando las fuerzas axiales de diseño y de sollicitación (ANSI/AISC 360-05, 2005), se procede:

$$\frac{P_r}{P_c} \geq 0.2$$

$$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} * \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (4)$$

$$\frac{P_r}{P_c} < 0.2$$

$$\frac{P_r}{2P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (5)$$

Donde: P_r es la carga axial última; P_c es la carga axial resistente; M_{rx} es el momento último alrededor del eje X; M_{ry} es el momento último alrededor del eje Y; M_{cx} es el momento resistente de la sección alrededor del eje X; M_{cy} es el momento resistente de la sección alrededor del eje Y.

Con las ecuaciones (4) y (5), se verifica si las sollicitaciones de momento son capaces de ser resistidas por las vigas. De idéntica manera se verifica para las columnas del sistema estructural, en donde también se realiza un análisis de segundo orden y se utiliza las siguientes ecuaciones:

$$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{\sum P_u}{H} * ID} \geq 1 \quad (6)$$

Donde: B_2 es el factor de amplificación de momento P- Δ ; $\sum P_u$ es la sumatoria de todas las fuerzas axiales últimas del piso donde se encuentra la columna analizada; H es la sumatoria de las fuerzas sísmicas del piso donde se encuentra la columna analizada; ID es la deflexión lateral de entrepiso.

$$B_1 = \frac{C_m}{1 - \frac{P_u}{P_e}} \geq 1 \quad (7)$$

Donde: B1 es el factor de amplificación de momento P-δ; Cm es el factor de momento equivalente; Pu es la carga axial última de la columna de análisis; Pe es la carga de pandeo elástico.

Las ecuaciones (6) y (7), (ANSI/AISC 360-05, 2005), permiten realizar un análisis de segundo orden, y obteniéndose el momento mayorado (8), se puede realizar un diseño plástico de las columnas con la ecuación (3), ya que todos los perfiles escogidos para tal propósito son compactos.

$$M_u = B_1 * M_{nt} + B_2 * M_{t1} \quad (8)$$

Donde: Mu es el momento último; Mnt es el momento causado por fuerzas gravitacionales; Mt1 es el momento causado por fuerzas de sismo.

Las vigas de piso se las diseñan tomando en cuenta los recortes realizados a causa de equilibrar el nivel entre la viga principal y la viga de piso (AISC, LRFD Manual, 2005), como se observa en la figura 7.

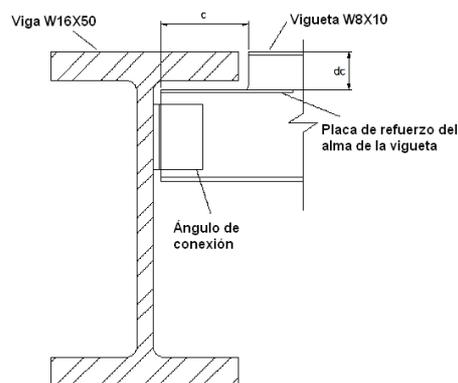


Figura 7.- Recorte de la viga de piso

2.2.1 Diseño de conexiones

Se consideran dos tipos de conexiones, Conexiones de Cortante Simple y Conexiones de Momento, (ANSI/AISC 360-05, 2005).

Las conexiones de cortante simple son aquellas que se utiliza para la conexión de la viga de piso y la viga principal y tan solo transmite el cortante debido a cargas gravitacionales.

Las conexiones de momento son aquellas que transmiten además del cortante el momento ocasionado por las cargas de sismo.

Como se indica en la figura 8, (AISC, LRFD Manual, 2005), cuando existe una mayor restricción a la rotación de la conexión se realiza una conexión de momento, mientras que a una mayor libertad de rotación se establece una conexión de cortante simple.

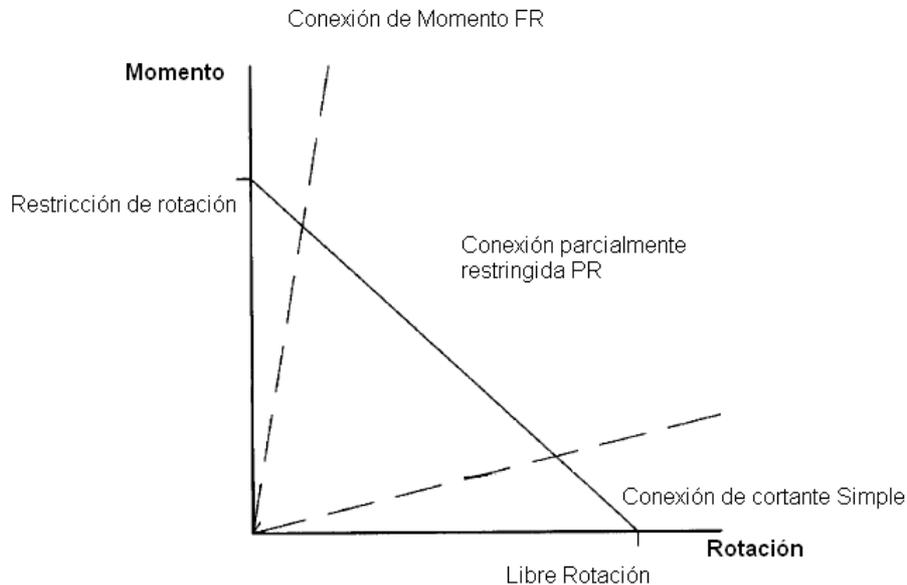


Figura 8.- Gráfico Momento-Rotación para conexiones de elementos de acero

En el presente trabajo se realiza la conexión de cortante simple con cordones de soldadura de acuerdo a los códigos de diseño, (ANSI/AWS D1.1, 2006), este tipo de conexión se la realiza entre la viga principal y la viga de piso, el medio de unión es un ángulo estructural como se aprecia en la figura 9.

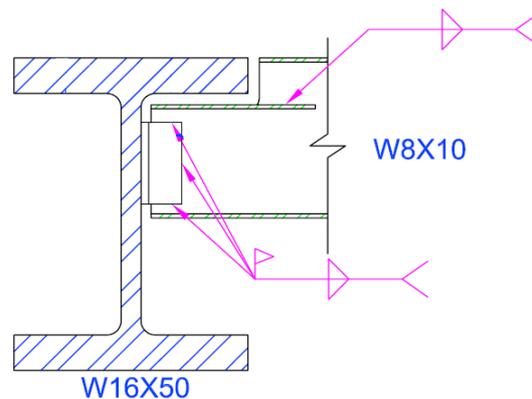


Figura 9.- Conexión de cortante simple

De igual manera se utiliza soldadura para las conexiones de momento además de la utilización de pernos, como se observa en la figura 10, esta conexión se la realiza entre las vigas principales y las columnas del sistema estructural. La presencia del sismo hace que la conexión totalmente restringida sea necesaria, la geometría que se observa en la figura 10 es definida para condiciones sismo resistentes (ANSI/AISC341-05, 2005).

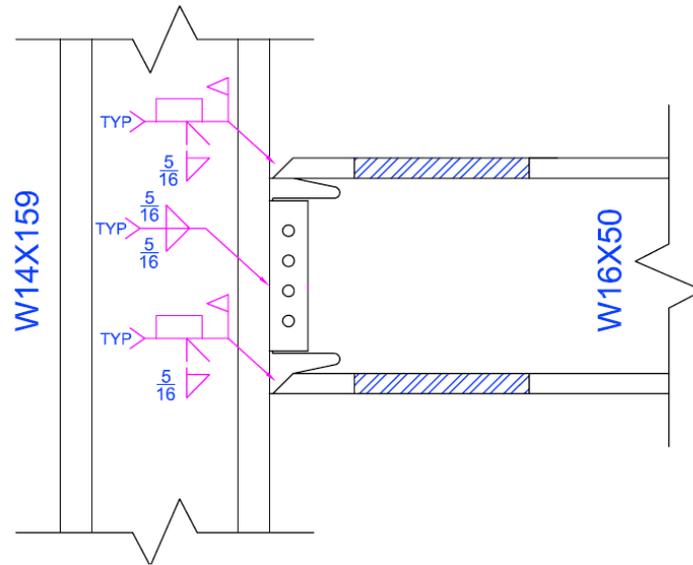


Figura 10.- Conexión de Momento

Los pernos que se utilizan en el presente trabajo son pernos de alta resistencia ASTM A490, los mismos que tienen tratamiento térmico y una resistencia a la tensión de 150 ksi (Vinnakota 2006).

Para desalojar las articulaciones plásticas debidas al sismo se realizan los cortes a las vigas principales, como se indica en la figura 11, (ANSI/AISC 358-05)

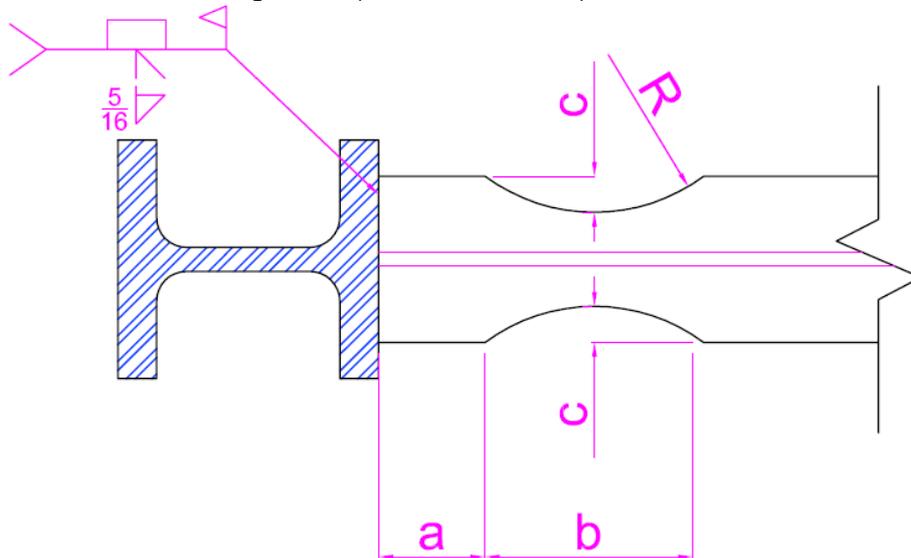


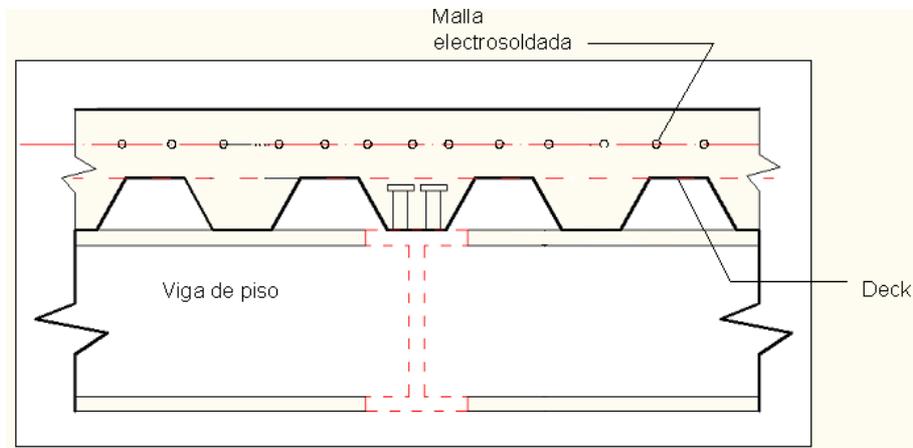
Figura 11.- Vista de planta del detalle del recorte de los patines de la viga principal

Los valores de la figura 11 se los presenta en la tabla 4:

Tabla 4.- Valores de los recortes realizados a los patines de las vigas principales

Geometría (plg)	pisos 1-2	Pisos 3-5	Pisos 6-8
A	4,50	4,50	4,50
B	12,50	12,50	12,50
C	1,60	1,25	1,25
R	13,00	16,25	16,25

El sistema de piso de la presente estructura está constituido de un sistema metálico conocido como deck y la losa de hormigón, todo este conjunto acompañado de una malla metálica, como se indica en la figura 12, con esto se consigue que todo el sistema de losa funcione como un solo elemento, considerándolo como piso rígido necesario para el análisis sísmico de la presente estructura, (Mc Cormac, 2005).

**Figura 12.-** Sistema deck-viga de piso

2.2.2 Diseño del Sistema estructural de acero según la deriva de piso.

Para el diseño del sistema estructural de acero se escogieron los siguientes perfiles estructurales de acero:

Tabla 5.- Cuadro de perfiles estructurales del sistema estructural

Piso	Columnas	Vigas
1	W14X370	W18X192
2	W14X370	W18X192
3	W14X311	W18X158
4	W14X311	W18X158
5	W14X311	W18X158
6	W14X193	W18X97
7	W14X193	W18X97
8	W14X193	W18X97

En este diseño se observa que la deriva de piso es inversamente proporcional a la demanda capacidad a causa del sismo, los perfiles estructurales indicados en la tabla 5, son extremadamente pesados, con ellos se obtiene una deriva de piso de 1,4%, que es menor a 1,5% recomendado para

estructuras de hormigón armado (Aguiar 2007). El diseñar en base a la demanda capacidad o deriva de piso, dependerá del fin ocupacional del sistema estructural, muchas veces el equipo que se encuentra en el interior de un edificio es más costoso que la misma estructura, es por ello que un diseño en función de la deriva de piso es recomendable para cuando se tenga este propósito ocupacional.

2.3 Diseño del sistema estructural de Hormigón Armado

El hormigón elegido para el diseño del sistema estructural es de 210kg/cm², varillas de 4200 kg/cm² de resistencia a la fluencia de diversos diámetros. Se siguió lo prescrito en el ACI (2005).

Tabla 6.- Cuadro de longitudes de vigas y columnas (cm)

Piso	Columnas	Vigas
1	75X75	40X70
2	75X75	40X70
3	70X70	35X60
4	70X70	35X60
5	70X70	35X60
6	65X65	30X50
7	65X65	30X50
8	65X65	30X50

A diferencia del sistema estructural de acero, en el cual se obtuvieron diagramas de momento anti simétricos, en esta estructura existen diagramas simétricos, ya que cada una de las columnas es de geometría cuadrada, como se indica en la figura 13.

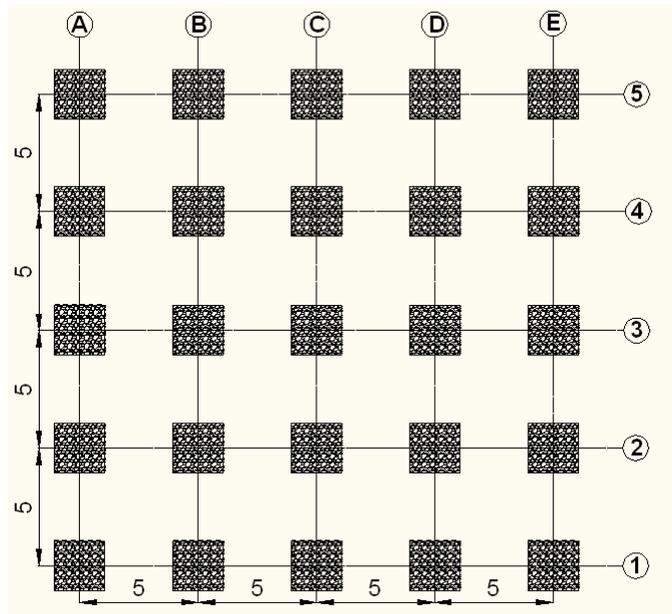


Figura 13.- Vista de planta del sistema estructural de hormigón armado

Para el diseño del sistema estructural de hormigón armado se consideró una deriva de piso del 1,25%, con los programas rlxinfi.m y modalespacial3GDLnew, (Aguiar, 2008) se establecieron los siguientes resultados, que se destacan en las tablas 7 y 8.

Tabla 7.- Fuerzas laterales de sismo para la estructura en sentido X e Y (toneladas)

Piso	Pórtico 1	Pórtico 2	Pórtico 3	Pórtico 4	Pórtico 5
1	7,42	7,42	7,42	7,42	7,42
2	8,16	8,16	8,16	8,16	8,16
3	6,17	6,17	6,17	6,17	6,17
4	4,35	4,35	4,35	4,35	4,35
5	4,66	4,66	4,66	4,66	4,66
6	5,48	5,48	5,48	5,48	5,48
7	10,04	10,04	10,04	10,04	10,04
8	22,99	22,99	22,99	22,99	22,99

Tabla 8.- Resumen de los datos obtenidos a través del programa modalespacial3GDLnew.m

Piso	Sentido X e Y	
	Deriva de piso	Desplazamientos inelásticos en centro de masas (m)
1	0,0055	0,0222
2	0,0082	0,0510
3	0,0099	0,0857
4	0,0109	0,1237
5	0,0107	0,1612
6	0,0123	0,2041
7	0,0125	0,2479
8	0,0097	0,2818

2.3.1 Diseño de vigas y columnas

A partir de las solicitaciones de momento y cortante obtenidas, se inicia el diseño de vigas y columnas del sistema estructural de hormigón armado. A partir de las consideraciones del bloque de Withney, (Romo 2008) se realiza el diseño respectivo.

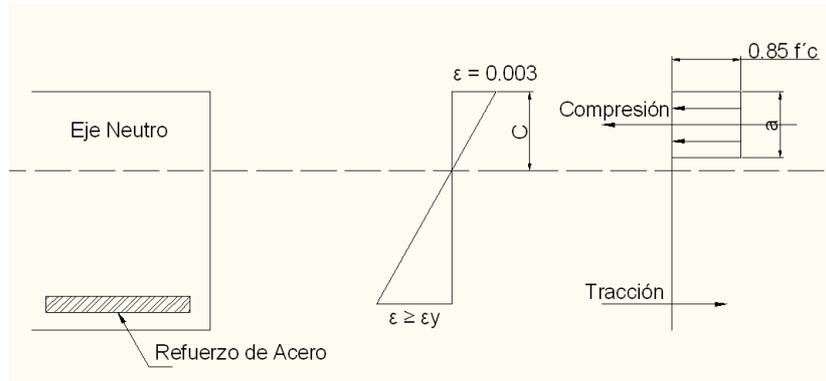


Figura 14.- Parámetros del bloque de Withney

Se debe considerar los parámetros del bloque de Withney indicados en la figura 14. A través de la ecuación 9 se establece la cantidad de acero de refuerzo que se requiere de acuerdo a la geometría de la viga a diseñar, (Romo 2008).

$$A_s = \frac{k}{F_y} * \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 * M_u}{\phi * k * d}} \right) \quad (9)$$

$$k = 0.85 * f'c * b * d$$

Donde: F_y es el límite de fluencia del acero de refuerzo; M_u es el momento último; d es la distancia desde el centroide de la armadura de acero a la fibra superior de la viga; b es el ancho de la viga; ϕ es el factor de resistencia.

A través de las ecuaciones 10, 11 y 12 se calculan las cuantías balanceada mínima y máxima, con esto se controla que la cantidad de acero calculada con la ecuación 9 esté dentro de los rangos permitidos.

$$\rho_b = 0.85 * \beta_1 * \frac{f'c}{F_y} * \left(\frac{0.003}{\frac{F_y}{E_s} + 0.003} \right) \quad (10)$$

Donde: β_1 es el coeficiente para vigas rectangulares; $f'c$ es la resistencia a la compresión del hormigón; E_s es el módulo de elasticidad del acero de refuerzo.

$$\rho_{min} = \frac{14}{F_y} \quad (11)$$

$$\rho_{max} = 0.667 * \rho_b \quad (12)$$

Donde: ρ_b es la cuantía balanceada

Para comparar si los esfuerzos causados por las solicitaciones de momento son soportados por las dimensiones de la viga, se procede a calcular los siguientes parámetros que se detallan en las ecuaciones 13, 14, 15 donde todos ellos provienen de la figura 14.

$$T = A_s * F_y \quad (13)$$

$$\alpha = \frac{T}{0.85 * f'_c * b} \quad (14)$$

$$M = T * \left(d - \frac{\alpha}{2} \right) \quad (15)$$

Donde: T es la fuerza de tracción del acero de refuerzo; a es la altura del bloque de Withney; M es el momento resistente de la sección de la viga.

Como el diseño de la estructura de hormigón armado, al igual que su similar de acero utiliza el método LRFD, entonces se establece la siguiente relación:

$$M_u \leq \phi * M \quad (16)$$

Donde: Mu es el momento último; M es el momento resistente de la sección; ϕ es el factor de resistencia a la flexión.

Se establece la consideración que establece el CEC2000, en lo correspondiente a la colocación de los estribos de refuerzo. Para el diseño de columnas se establece un análisis de segundo orden, con el fin de analizar los efectos P-delta de la estructura. Con los momentos últimos obtenidos se realiza un análisis de flexocompresión uniaxial a través de la ecuación 17 (Romo 2008).

$$M_u = \sqrt{M_{ux}^2 + M_{uy}^2} \quad (17)$$

Donde: Mux es el momento último alrededor del eje X; Muy es el momento último alrededor del eje Y.

Se establecen las condiciones de apoyo de las columnas a través de los nomogramas para pórticos no arriostrados (Romo 2008) que se indica en la figura 15.

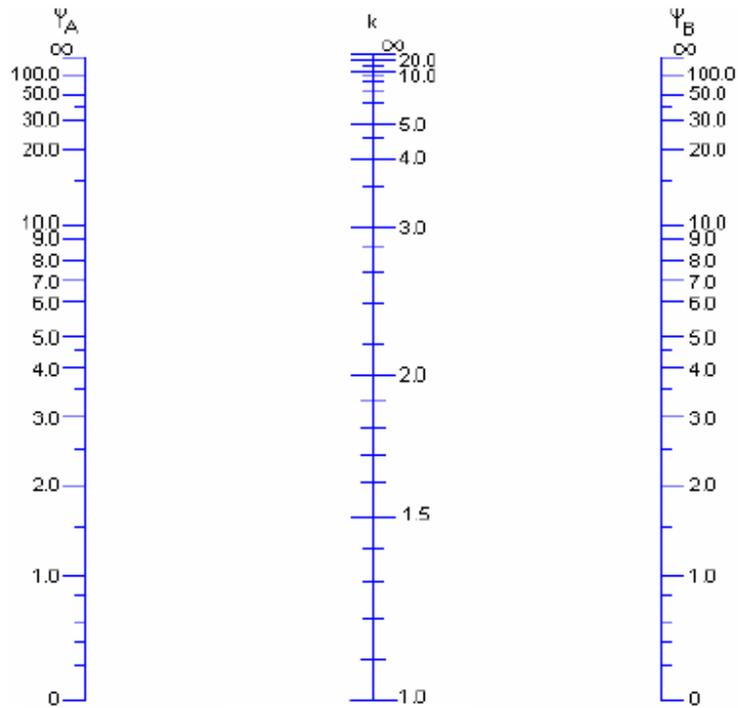


Figura 15.- Nomograma para pórticos no arriostrados

Con el gráfico de diseño de columnas (Romo, 2008), que se indica en la figura 16, se establece la cantidad de acero de refuerzo que las columnas de hormigón armado necesitan para soportar las solicitaciones de diseño.

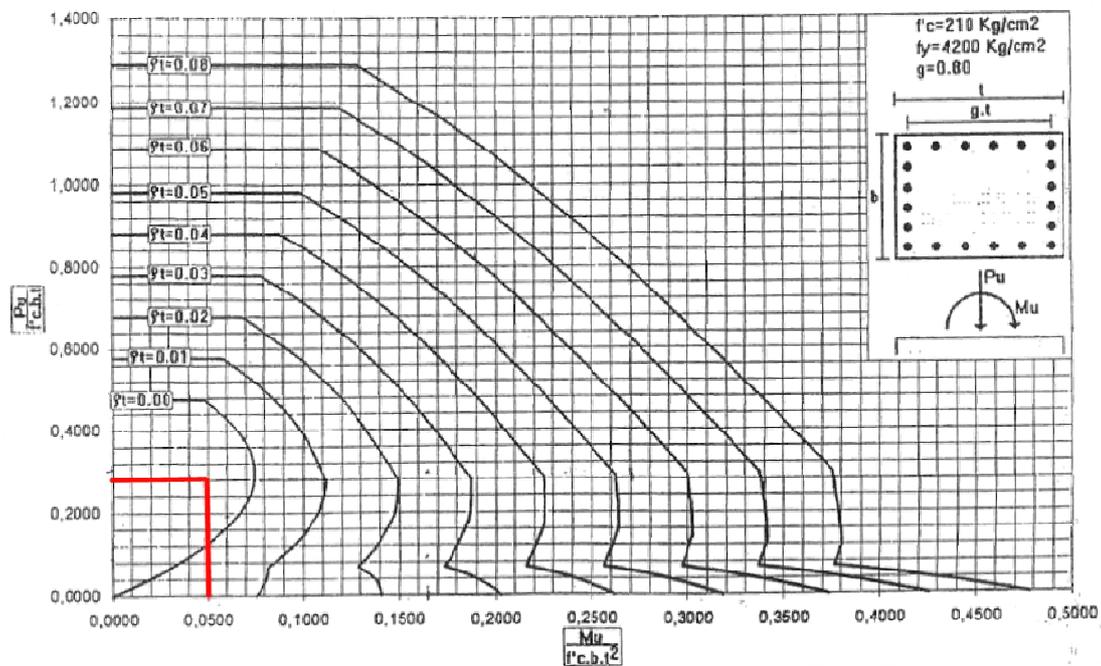


Figura16.- Gráfico de diseño para columnas de hormigón armado

De idéntica manera que las vigas en lo referente al cortante, se establece lo que dispone el CEC2000. Para el análisis de la conexión viga columna se realiza un análisis de corte vertical, horizontal, adherencia y confinamiento (Aguar-Barbat, 1997), además de un chequeo de la teoría columna fuerte-viga débil. La losa diseñada en el presente trabajo es nervada de 25cm de espesor y se utiliza un armado mínimo requerido para las solicitaciones de cargas gravitacionales.

3. Resultados

En lo referente a los desplazamientos inelásticos se puede observar que la estructura de acero posee desplazamientos mayores en alrededor de un 50% más que su par de hormigón, como se puede observar en la tabla 9, esto predice en decidirse en una estructura de acero cuando los fines ocupacionales del edificio sean los mismos para ambos materiales.

Cabe destacar que las derivas de piso son distintas para ambos sistemas estructurales, esto se debe considerar, por condiciones de rigidez en el edificio de hormigón armado y flexibilidad en el edificio de acero, es decir se debe conocer las bondades que presta cada uno de estos materiales a fin de determinar con que deriva de piso se debe diseñar cada una de estas estructuras.

Tabla 9.- Comparación de los desplazamientos inelásticos de los sistemas estructurales

Acero	Hormigón Armado
Desplazamientos inelásticos en centro de masas (m) (Deriva 2,14%)	Desplazamientos inelásticos en centro de masas (m) (Deriva 1,25%)
0.0512	0.0222
0.1154	0.0510
0.1831	0.0857
0.2474	0.1237
0.3082	0.1612
0.3832	0.2041
0.4494	0.2479
0.4942	0.2818

Con respecto a los tiempos de ejecución se destacar que la estructura de acero se la termina en la mitad de tiempo que la estructura de hormigón armado, por razones de fraguado del hormigón.

La mano de obra requerida para la ejecución de la estructura de acero es más costosa, que su par de hormigón armado, como se observa en la tabla 10 los soldadores deben ser calificados con procedimientos de soldadura WPS (Welding Procedure Specification) (ANSI/AWS D1.1, 2006), y esto conlleva a un nivel de preparación alto por parte de este personal, además se debe contratar un inspector de calificación de soldadores CWI (Certified Welding Inspector), por su parte la ejecución de la estructura de hormigón armado relativamente es barata, ya que el nivel de preparación de los obreros no exige que sea alto.

Tabla 10.- Comparación del costo de la mano de obra

Hormigón Armado		Acero	
Personal	Costo	Personal	Costo
Jefe de obreros	Medio	Inspector de Soldadura AWS- CWI	Alto
Obreros	Medio	Soldadores calificados AWS D1,1	Alto
Equipo	Medio	Equipo	Alto

La construcción del edificio de acero es más costoso que el edificio de hormigón armado, esto se debe a que el Ecuador no es productor de acero y por ende se lo debe importar, pero este inconveniente se lo compensa con la rapidez de ejecución de la obra lo que hace que la recuperación de la inversión sea más pronta que la estructura de hormigón armado.

4. Conclusiones

En el sistema estructural de acero se establece que las conexiones de viga a columna es la parte más compleja a diseñar, ya que se deben considerar conceptos de soldadura, en los cuales interviene clasificación de procesos y electrodos.

El recorte realizado a las vigas principales del sistema estructural de acero es de suma importancia, ya que a través de ellas se desalojan las articulaciones plásticas que genera un determinado sismo.

Se puede realizar un diseño en el cual la deriva de piso sea mayor a la recomendada por el CEC 2000, ya que gracias a la gran ductilidad y flexibilidad del acero los desplazamientos inelásticos de cada piso pueden ser soportados sin un mayor daño de la estructura.

El diseño plástico realizado en este trabajo ha demostrado la gran utilidad que presta el diseño por resistencia y factores de carga LRFD, que ha entrado en reemplazo del ya tradicional diseño por esfuerzos admisibles, el cual consideraba un análisis elástico el mismo que no utilizaba del todo las bondades características del acero.

El comportamiento de la losa del sistema estructural de acero debe ser de tal forma que se comporte como un solo material, es decir el deck metálico y el concreto deben ser capaces de resistir el cortante generado por las cargas gravitacionales, y esto se lo consigue con la colocación de conectores de cortante, los cuales se diseñan de acuerdo a los códigos de diseño de AISC.

La estructura de hormigón armado es más rígida, y por ende no es tan flexible como su par de acero, esto conlleva a diseñar específicamente con derivas de piso menores a lo que establece el CEC 2000.

Las conexiones de la estructura de hormigón armado tienen que ser revisadas de tal forma que las fuerzas laterales no ocasionen daños severos a la estructura, controles de cortantes verticales, horizontales, adherencias del hormigón, son algunos de los controles que se deben efectuar a dichas conexiones, además de la verificación columna fuerte-viga débil.

El colocar acero de refuerzo en forma excesiva puede ser perjudicial ya que no podría fluir de forma esperada ante un sismo, haciendo que las conexiones se vuelvan frágiles ya que el sismo solo estaría siendo soportado por el hormigón a causa de la gran cantidad de acero que se demora en entrar en fluencia.

Se debe calcular la cuantía balanceada para establecer la cuantía máxima de diseño, con el fin de evitar las consecuencias descritas en el párrafo anterior.

REFERENCIAS

1. Aguiar R., (2004), *Análisis Matricial de Estructuras*, Tercera edición., Quito, Editorial ESPE.
2. Aguiar R., (2007) *Dinámica de Estructuras con Matlab*, Primera edición., Quito, Editorial ESPE, Colegio de Ingenieros Civiles de Pichincha.
3. Aguiar R., (2008), *Análisis Sísmico de Edificios*, Primera edición., Quito., Quito, Editorial ESPE.
4. Aguiar y Barbat, (1997), *Daño Sísmico en Edificios de Hormigón Armado*.
5. Romo M., (2008), *Temas de Hormigón Armado*, Escuela Politécnica del Ejército, Quito.
6. Mc Cormac., (2005), *Diseño de Estructuras de Acero Método LRFD*, Editorial Alfaomega, Segunda edición.
7. Vinnakota S.,(2006) *Estructuras de acero: comportamiento y LRFD*, Editorial McGraw-Hill, Primera edición en español, Traducida al español por McGraw-Hill.
8. ACI 318, (2005), *Requisitos de reglamento para concreto estructural (ACI 318S) y comentario*, Versión en español y en sistema métrico.
9. ANSI/AISC 360-05, (2005), *Specification for Structural Steel Buildings*, Illinois, Chicago, Estados Unidos de América.
10. ANSI/AWS D1.1, (2006), 550 N.W. LeJeune Road, Miami, FL 33126.

11. ANSI/AISC 341-05, ANSI/AISC 341s1-05, (2005), *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, Second Printing, Illinois, Chicago, Estados Unidos de América.
12. AISC LRFD, *Steel Construction Manual*, Décima tercera edición, Illinois, Chicago, Estados Unidos de América.
13. ANSI/AISC 358-05, (2005), *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications*, Primera edición, Illinois, Chicago, Estados Unidos de América.
14. *Código Ecuatoriano de la Construcción* (2000), CEC-2000.

CONTAMINACIÓN POR MERCURIO DE AGUAS Y SEDIMENTOS DE RÍOS QUE RECIBEN EFLUENTES DE LA MINERÍA DE ORO EN LOS SECTORES DE NAMBIJA, PONCE ENRÍQUEZ Y PORTOVELO

Luis H. Cumbal F.⁽¹⁾, Juan C. Duran L.⁽²⁾, Luis Albuja V.⁽³⁾

⁽¹⁾Centro de Investigaciones Científicas
Escuela Politécnica del Ejército

⁽²⁾Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente
Escuela Politécnica del Ejército

⁽³⁾Departamento de Ciencias Biológicas
Escuela politécnica Nacional

RESUMEN

Bella Rica, Nambija y Portovelo son distritos mineros donde se explota oro con la ayuda de mercurio para la amalgamación. Los residuales líquidos del proceso de extracción mezclados con partículas de amalgama son eliminados a los cuerpos de agua. El objetivo de esta investigación fue medir la contaminación actual por mercurio en aguas y sedimentos de los ríos, que reciben efluentes de la minería de oro en los tres distritos. Las concentraciones más elevadas de mercurio encontradas en el agua de los ríos y piscinas de los tres distritos mineros fueron: en las Chanchas del río Calera (Portovelo) 1812,5 µg/L, en Bella Rica-parte baja (Ponce Enríquez) 47,88 µg/L y 29,84 µg/L en la Quebrada Calixto (Nambija). Por otra parte, los mayores contenidos de mercurio en los sedimentos fueron: 440,76 µg/kg, 398,21 µg/kg, 256,88 µg/kg en Ponce Enríquez, Portovelo y Nambija, respectivamente. Las elevadas concentraciones de mercurio encontradas en las aguas de los ríos pueden ser atribuidas al vertido de las aguas residuales del proceso de extracción de oro o también a la lixiviación del metal desde los sedimentos por las crecidas de los ríos. Los sedimentos en cambio acumulan mercurio porque sus partículas sólidas activas, ligan e inmovilizan al mercurio en sus estructuras a medida que el material particulado viaja con las aguas de los ríos y además debido a la hidrofobicidad del mercurio. De estos resultados, se puede decir que las operaciones mineras que extraen oro son las responsables de las elevadas concentraciones de mercurio en los medios estudiados.

ABSTRACT

Bella Rica, Nambija, and Portovelo are mining areas where gold is extracted using mercury for amalgam formation. Waste liquids from the extraction process mixed with amalgam particles are eliminated to water bodies. The objective of this study was to measure actual mercury contamination in waters and sediments of rivers that receive effluents from gold mining in the three areas. The highest mercury concentrations found in waters of rivers and ponds of the three mining sites were: 1812,5 µg/L at the Chanchas of the Calera River (Portovelo), 47, 88 µg/L in Bella Rica-lower part (Ponce Enríquez), and 29,84 µg/L in Quebrada Calixto (Nambija). Conversely, the highest levels of mercury in sediments were: 440,76 mg/kg, 398,21 µg/kg, 256,88 mg/kg in Ponce Enríquez, Portovelo y Nambija, respectively. The highest concentrations of mercury found in waters of rivers can be attributed to the release of wastewater from gold extraction process or due to metal leaching from sediments associated to river overflows. On the contrary, sediments accumulate mercury because their active solid particles link and immobilize mercury within their structures as the particle material travels with river waters and besides due to

mercury hydrophobicity. From these results, it can be concluded that mining operations that extract gold are responsible for the high concentration in the investigated media.

1. INTRODUCCIÓN

En la minería del oro, luego de que el metal es concentrado gravimétricamente, es amalgamado con mercurio. La amalgamación se utiliza en la pequeña minería primaria y en la pequeña minería aluvial por ser una técnica económica y que necesita muy pocos instrumentos de trabajo. Entre los métodos que se emplean para la amalgamación se incluye, el de circuito abierto, proceso en el que todo el material aurífero se pone en contacto con mercurio en un flujo continuo. Con esta técnica no es posible recuperar todo el mercurio y una parte de éste, en forma de mercurio elemental o en forma de amalgama escapa con las aguas residuales, contaminando los alrededores: El de circuito cerrado en cambio es una técnica en la que sólo porciones del material es puesto en contacto con el mercurio, por ejemplo los concentrados del material que sale de los canalones o aquellos que están a continuación de los molinos. Luego de formar las "bolas de amalgama", éstas son quemadas en retortas artesanales. Las retortas recuperan el 20% mercurio en forma de condensado y el resto se evapora o emite al ambiente (Donoghue, 1998). La quema de la amalgama produce varias especies de mercurio como el vapor de mercurio (Hg^0), HgO , Hg^{2+} y el mercurio condensado en partículas (Lacerda & Salomons, 1998).

El mercurio elemental liberado a la atmósfera durante el proceso de amalgamación y vaporización del oro se oxida a Hg^{2+} a través de reacciones en mediadas por el ozono. En las áreas agrícolas donde se realizan quemadas de materia vegetal y bosques, se incrementa la concentración del ozono en la parte baja de la atmósfera y consecuentemente puede acelerarse la oxidación del mercurio mediante la siguiente reacción $Hg^0 + O_3 + 2H \rightarrow Hg^{2+} + O_2 + H_2O$ (Hall, 1995). El ión mercurio Hg^{2+} es rápidamente lavado por las frecuentes lluvias en los bosques tropicales y penetra a los ambientes acuáticos y se absorbe en los sedimentos y en la materia particulada desde donde es metabolizado por los organismos a metilmercurio y dimetilmercurio (A. Sigel & H. Sigel, 1997). Estos compuestos son tóxicos y se absorben con facilidad a través de la piel, son solubles y entran a la red trófica acuática, concentrándose en los predadores como los peces (USGS, 2000). El impacto en la población que ingiere especies acuáticas con elevadas concentraciones de metilmercurio o dimetilmercurio es letal y pueden sufrir daños serios en el hígado y en los riñones (PNUMA, 2005). La exposición crónica a mercurio elemental, puede generar déficit en el desarrollo neurológico y de comportamiento (Ozuah, 2001; Tirado *et al.*, 2000), que puede incluir daños sutiles en la memoria visual, atención y velocidad en las respuestas visuales, auditivas y psicomotoras (Counter *et al.*, 2002, Ellingsen *et al.*, 2001), pérdida reversible de la capacidad para distinguir colores (Cavalleri y Gobba, 1998) y además de inflamaciones severas de la piel (Zimmer *et al.*, 1997; Boyd *et al.*, 2000). En un estudio de Millar (2002), se afirma que las personas que habitan en los alrededores de un foco de contaminación con mercurio están expuestas a través de dos rutas de exposición: i) inhalación e ingestión de mercurio elemental derramado; e ii) ingestión de mercurio iónico, luego de la oxidación del mercurio elemental. Por otra parte, la exposición al mercurio puede causar efectos neurológicos graves en organismos superiores, como se comprobó en Minamata, Japón en 1950-1952. En este lugar, las aves mostraron signos de enfermedades neurológicas, incluso convulsiones y ataques; en los gatos cuya dieta contenía mucho pescado, se observó movimientos altamente erráticos (PNUMA, 2005).

Por la alta toxicidad del mercurio, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, 1974) fija como límite máximo alcanzable en agua de consumo humano 2 $\mu g/L$ de mercurio y el Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria (TULAS, 2003) establece como límite máximo permisible 1 $\mu g/L$. Adicionalmente, en las aguas residuales que se vierten en cuerpos de agua dulce, el

contenido de mercurio no debe ser mayor a 5 µg/L (TULAS, 2003). Por otra parte, la Organización para la Agricultura y Alimentación y la Organización Mundial de la Salud ha fijado como Ingesta Semanal Provisional Tolerable (ISPT) 0,33 µg metilmercurio/ kg peso corporal (FAO/OMS, 1999).

En el Ecuador la minería de oro tiene sus orígenes en el área Portovelo-Zaruma y según el estudio del Ministerio de Energía y Minas (1998) comenzó en 1896. La pequeña minería o minería informal, surge en la zona sur oriente del país a finales de los años 70, debido a la quiebra de grandes e importantes compañías extranjeras que explotaban oro en la zona de Zaruma y Portovelo (Sandoval, 2001). En Nambija, con el descubrimiento del oro a principios de los 80, se inició la migración de mineros según afirma Sandoval (2001). En Bella Rica, campo minero enclavado en el este de la Provincia de Azuay, la explotación de oro se inició en 1983 (Appleton, 1996). El Ministerio de Energía y Minas (1998) reporta que el mercurio es usado en las áreas mineras del sur del Ecuador para extracción del oro desde los concentrados mediante amalgamación. Consecuentemente, las aguas residuales del proceso de extracción mezcladas con partículas de amalgama son eliminadas a los cuerpos de agua y contaminan su cauces.

El Proyecto de Desarrollo Minero y Control Ambiental llevó a cabo el monitoreo ambiental de las áreas mineras en el sur del Ecuador y reporta relativamente bajas concentraciones de mercurio en aguas de los ríos y sus sedimentos, en las cercanías de las zonas mineras (PRODEMINCA, 1998). Desafortunadamente, en ese estudio no se reporta el mecanismo de movilización y evolución del tóxico en la zona de estudio. No se conoce de otros estudios que hayan cuantificado la cantidad de mercurio presente en las aguas y sedimentos en esa zona minera. El objetivo de esta investigación fue medir la contaminación actual por mercurio de aguas y sedimentos en los ríos que reciben efluentes de la minería de oro en los sectores de Nambija, Ponce Enríquez y Portovelo y compararla con el estudio de PRODEMINCA.

2. ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se desarrolló en la zona Sur del Ecuador entre 2°11' S y 4°30' S e incluye en tres provincias: Azuay, Zamora Chinchipe y El Oro. En cada provincia, se seleccionó una localidad (ver Fig. 1). El distrito minero de Bella Rica (Ponce Enríquez, Provincia del Azuay), está ubicado a una altura entre 50 y 1600 m.s.n.m. y tiene clima tropical húmedo. Los yacimientos minerales de Bella Rica contienen piritita, calcopiritita y arsenopiritita, mientras que el lecho rocoso está conformado por rocas volcánicas andesíticas y basálticas (PRODEMINCA, 1998). El distrito minero de Nambija (Provincia de Zamora Chinchipe) está localizado a una altura que oscila entre los 700 y 1400 m.s.n.m y goza de un clima tropical medio seco. Posee rocas volcánico-sedimentarias con intrusiones de granodiorita. Las mineralizaciones relacionadas con estas intrusiones son yacimientos irregulares de sulfuro-skarn o sulfuro con vetas de cuarzo (PRODEMINCA, 1998). El distrito minero Portovelo-Zaruma (Provincia del Oro) se encuentra entre los 1500 y 2100 m.s.n.m. y es una zona con clima tropical húmedo. En esta región el oro parece asociado con vetas de cuarzo y las rocas son volcánicas dacíticas-andesíticas (PRODEMINCA, 1998). Los yacimientos son complejos sistemas de vetas profundas en una zona de aproximadamente 50 km. de largo 10 km. de ancho y 1400 m verticalmente.

3. MUESTREO Y PROCEDIMIENTOS ANALÍTICOS

3.1 Muestreo

Muestras de agua y sedimentos fueron tomadas de ríos y piscinas ubicados en el área de estudio (puntos de muestreo ver en Figs. 2 y 3). Las investigaciones del campo incluyeron, el posicionamiento de los sitios de muestreo en los cuerpos de agua utilizando un sistema portátil de posicionamiento global (GPS) y las medidas de los parámetros de campo como pH, temperatura y conductividad eléctrica. El muestreo de aguas involucró la recolección de: i) muestras filtradas sin acidificar (0,45 para análisis de aniones) y ii) muestras filtradas acidificadas (para análisis de Hg). Las

muestras fueron transportadas en un enfriador a los laboratorios de ESPE para un análisis químico detallado.

El muestreo de los sedimentos se realizó tomando un peso aproximado de 0,5 kg desde un punto situado a 5 cm debajo de la superficie para cada sitio muestreado. Las muestras fueron luego almacenadas en contenedores plásticos y transportadas a los laboratorios en otro enfriador.

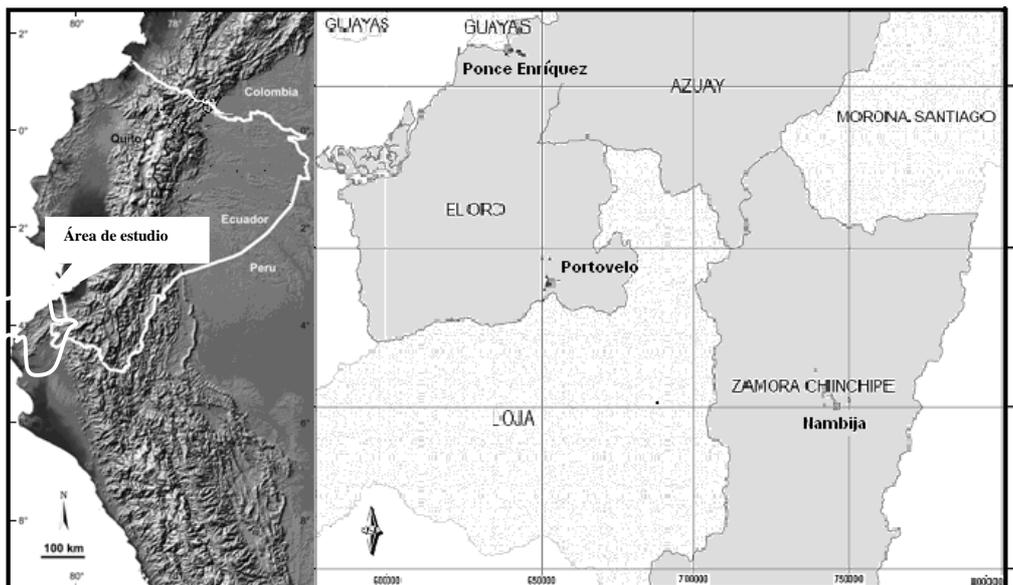


Figura 1. Área de estudio en la zona sur del Ecuador y localización de los puntos de muestreo.

3.2 Extracción de arsénico de los sedimentos

Las muestras de sedimentos fueron secadas durante 12 horas en una estufa a una temperatura de 60°C. Los sedimentos secos fueron disgregados utilizando un mortero y pistilo y luego fueron tamizados con un cedazo de 425 μm de diámetro. Las muestras tamizadas (250 mg) fueron sumergidas en 125 mL de HCl-4 N y colocadas en un agitador rotativo durante 48 horas a 40 rpm. Posteriormente, los extractos fueron filtrados usando filtros de 0,45 mm y analizados por mercurio.

3.3 Análisis químico

Las muestras de agua acidificadas y los extractos diluidos fueron analizadas por mercurio usando un Generador Hidruros Perkin Elmer (HG) acoplado a un espectrómetro de absorción atómica Perkin Elmer, AA100, empleando el método de vapor en frío, 3112 B del Standard Methods (APHA) modificado. Los resultados de los análisis químicos fueron validados, comparando los contenidos de mercurio con las soluciones estándar compradas a Sigma Aldrich.

4. RESULTADOS

Con el propósito de investigar los procesos que pueden controlar la distribución del mercurio en las aguas y sedimentos de ríos y piscinas dentro del área de estudio, los datos estas fuentes han sido

interpretados y comparados con resultados reportados por otros estudios. En general, se determina que el contenido de mercurio en los sedimentos y en las aguas de los ríos depende su localización en las zonas mineras.

4.1 Mercurio en aguas superficiales

Ponce Enríquez

En la Tabla 1 se indica la altura, longitud, latitud y concentraciones de mercurio total en los diferentes sitios de muestreo del área de estudio. De todas las muestras analizadas en la zona de Ponce Enríquez (Bella Rica), el contenido de mercurio más elevado corresponde a la muestra M16 (Fig. 2A, Bella Rica-parte baja) con 47,88 $\mu\text{g/l}$. Las 15 muestras restantes presentan valores de Hg_T inferiores a los 10 ($\mu\text{g/L}$) y oscilan entre 1,90 y 8,90 $\mu\text{g/L}$. Estos valores son superiores al reportado en el estudio realizado por PRODEMINTA en 1996-1998 (1 $\mu\text{g/L}$)

Nambija

En el distrito minero Nambija, se colectaron 13 muestras de agua superficial. De las 13 muestras analizadas, el valor más alto de concentración de mercurio total corresponde a la muestra M6 (29,84 $\mu\text{g/l}$), tomada en la Quebrada Calixto (Fig. 2B). Las muestras restantes presentan valores de concentración inferiores a 4 $\mu\text{g/L}$. En el estudio de PRODEMINTA las concentraciones de mercurio en la Quebrada Calixto se reportan ser 0.07-0.24 $\mu\text{g/L}$, más bajas que aquellas obtenidas en la presente investigación.

Portovelo

En el sector Portovelo, se colectaron 17 muestras de agua superficial, distribuidas en 16 sitios (Tabla 1). Del total de muestras analizadas, el valor más alto de concentración de mercurio total corresponde a la muestra M16 (Fig. 2C, Chanchas río Calera) con 1812,50 $\mu\text{g/L}$, mientras que el 50% del resto de muestras presentan valores inferiores a 1 $\mu\text{g/L}$ (Tabla 1).

4.2 Mercurio en sedimentos

Ponce Enríquez

En la Tabla 2 se indica altitud, longitud, latitud y concentración de mercurio total en sedimentos de ríos y piscinas dentro de la zona de estudio. En el distrito minero de Bella Rica, se observa que la concentración más alta fue medida en la muestra M13 (440,76 $\mu\text{g/Kg}$, Fig. 3A) mientras que la concentración más baja fue detectada es la de la muestra M12 con 3,16 $\mu\text{g/Kg}$. En la Figura 13 se observa que, aquellos sitios de muestreo ubicados en la parte alta del Cerro Bella Rica tienen valores de concentración bajos y van incrementándose a medida que se desciende el cerro. En la piscina de oxidación valores de concentración son medios y altos. Del total de muestras, solo cinco muestras tienen concentraciones de mercurio sobre la Norma de Calidad Ambiental del Recurso Suelo (TULAS, 2003).

Nambija

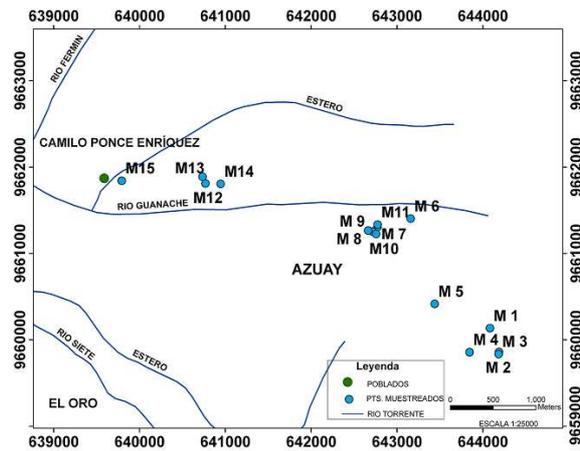
En el distrito minero de Nambija, se colectaron 16 muestras de sedimentos. De las muestras de suelo sometidas a extracción, la concentración más alta corresponde la muestra M1 con 256,88 $\mu\text{g/Kg}$, tomada en el nacimiento del río Nambija (Fig. 3B), mientras que más baja pertenece a la muestra M6 con 0,48 $\mu\text{g/Kg}$. Como se puede ver en la Tabla 2 las concentraciones de mercurio en las muestras se distribuyen casi uniformemente, con excepción de dos picos bastante notorios en las muestras M1 y M13 (Fig. 3B).

Tabla 1. Caracterización de las aguas de ríos y piscinas en tres regiones mineras del Sur del Ecuador (por localización de puntos de muestreo ver Figura 2).

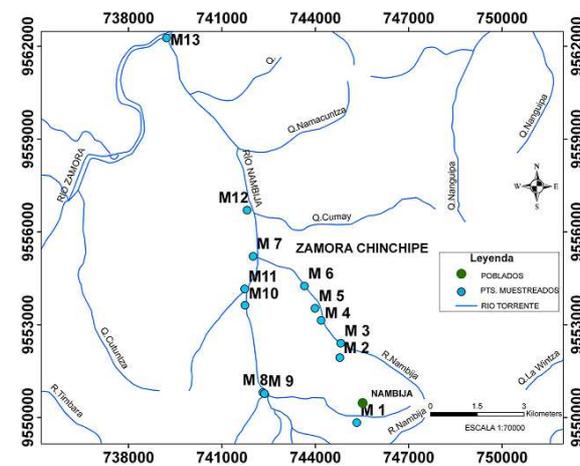
Muestra	Sitio de muestreo	Altitud (m.s.n.m.)	Longitud	Latitud	Hg _T (µg/L)
Ponce Enríquez (Bella Rica)					
M1	Bella Rica Parte Alta Bella Rica	976	9660134	644083	8,68
M2	Parte Alta	911	9659859	644187	5,94
M3	Bella Rica Parte Alta Bella Rica	906	9659835	644184	8,90
M4	Parte Media	852	9659857	643845	6,78
M5	Bella Rica Parte Media Bella Rica	756	9660416	643439	7,62
M6	Parte Media	481	9661404	643159	6,56
M7	Piscina de oxidación	433	9661305	642773	6,56
M8	Piscina de oxidación	414	9661255	642714	4,02
M9	Piscina de oxidación	419	9661266	642663	7,20
M10	Piscina de oxidación	451	9661225	642756	4,66
M11	Piscina de oxidación	417	9661334	642774	4,02
M12	Bella Rica Parte Baja	43	9661811	640768	4,02
M13	Bella Rica Parte Baja	65	9661888	640734	1,90
M14	Bella Rica Parte Baja	62	9661805	640946	5,72
M15	Bella Rica Parte Baja	40	9661843	639793	5,50
M16	Bella Rica Parte Baja	20	9660302	638704	47,88
Nambija					
M1	Riachuelo	1824	9549830	745334	3,57
M2	Quebrada 1	1425	9551935	744789	1,43
M3	Quebrada 2 (Camino de	1454	9552400	744816	0,19
M4	herradura)	1277	9553141	744187	0,14
M5	Quebrada 3	1257	9553528	743993	0,30
M6	Quebrada 4	1190	9554252	743652	29,84
M7	Quebrada Calixto	1040	9555210	742000	0,90
M8	Quebrada 7 y Río Nambija	1294	9550808	742316	0,51
M9	Quebrada 1.1	1305	9550770	742366	3,29
M10	Playas de Nambija	1122	9553627	741742	0,81
M11	Río Nambija aguas abajo	1090	9554156	741729	0,23
M12	Quebrada 1.2	974	9556705	741809	0,46
M13	Río Nambija antes de Zamora Gabarra	854	9562271	739221	0,57
Portovelo					
M1	Aguas termales	539	9590515	655897	8,59
M2	Río Amarillo	696	9590947	656011	0,49
M3	Puente de madera	688	9591133	656178	3,25
M4	Quebrada baja Zaruma	689	9590856	655892	14,89
M5	El Obrero	635	9588690	653112	0,28
M6	Río Amarillo junto al río Calera	597	9588153	651796	2,37
M7	Río Calera cerca de confluencia	602	9588371	651844	10,87
M8	Confluencia ríos Amarillo y	581	9586847	651104	6,24
M9	Calera	543	9586847	650535	0,03
M10	Cerca del río Pindo	538	9583613	650573	0,03
M11	Río Pindo	595	9589067	651999	0,03

M12	Río Calera cerca de chanchas	637	9591010	651832	2,95
M13	Río Calera cerca de puente Busa	778	9596966	650283	7,89
M14	Camino a Zaruma vía Busa	1015	9596646	650283	0,20
M15	Río Arcapamba	623	9589675	652092	24,57
M16	Canaleta cerca de chanchas	605	9588774	652999	1812,5
M17	Chanchas en río Calera Subiendo a Zaruma	1048	9592455	659320	00,50

a)



b)



c)

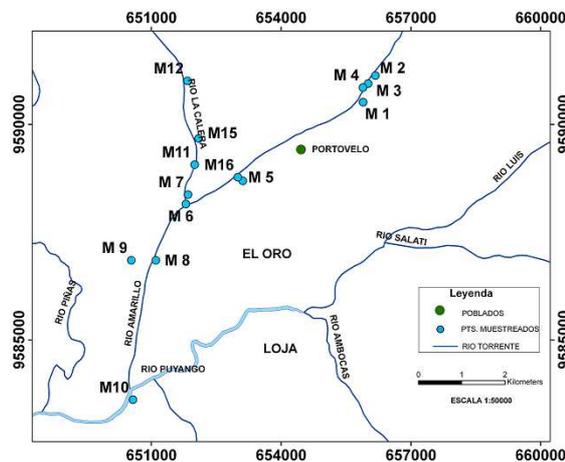


Figura 2 Localización de puntos de muestreo: a) Ponce Enríquez-Provincia del Azuay, b) Nambija-Provincia de Zamora Chinchipe, c) Portovelo-Provincia del Oro.**Tabla 2** Mercurio total en sedimentos de ríos y piscinas de tres regiones mineras al Sur del Ecuador (por localización de puntos de muestreo ver Figura 3).

Muestra	Sitio de muestreo	Altitud (m.s.n.m.)	Longitud	Latitud	Hg _T (µg/kg)
Zona Minera Bella Rica					
M1	Bella Rica Parte Alta	976	9660134	644083	10,34
M2	Bella Rica Parte Alta	911	9659859	644187	5,96
M3	Bella Rica Parte Media	756	9660416	643439	17,36
M4	Bella Rica Parte Media	481	9661404	643159	13,50
M5	Piscina de oxidación	433	9661305	642773	257,48
M6	Piscina de oxidación	419	9661281	642735	115,94
M7	Piscina de oxidación	419	9661266	642663	140,84
M8	Piscina de oxidación	451	9661225	642756	30,16
M9	Bella Rica Parte Baja	43	9661811	640768	8,94
M10	Bella Rica Parte Baja	65	9661888	640734	132,94
M11	Bella Rica Parte Baja	62	9661805	640946	4,74
M12	Bella Rica Parte Baja	40	9661843	639793	3,16
M13	Río Siete	20	9660302	638704	440,76
M14	Río Nueve	22	9660547	638843	10,88
M15	Chanchas Nelly	53	9661743	640095	27,72
Zona Minera de Nambija					
M1	Nacimiento río Nambija	1824	9549830	745334	256,8
M2	Gradas de Nambija	1879	9549863	745591	0,50
M3	Quebrada 1	1425	9551935	744789	62,22
M4	Quebrada 2 (Camino de herradura)	1454	9552400	744816	70,07
M5	Quebrada 3	1277	9553141	744187	49,25
M6	Quebrada 4	1257	9553528	743993	0,48
M7	Quebrada 5	1190	9554252	743652	67,81
M8	Quebrada 6	1051	9555157	742213	39,53
M9	Río Campanas	1040	9555210	742000	53,11
M10	Quebrada 1.1	1294	9550808	742316	23,66
M11	Quebrada 1.1	1294	9550808	742316	60,14
M12	Playas de Nambija	1305	9550770	742366	49,18
M13	Río Nambija aguas abajo	1122	9553627	741742	246,95
M14	Quebrada 1.2	1090	9554156	741729	23,44
M15	Río Nambija antes de Zamora	975	9556705	741809	35,72
M16	Gabarra	854	9562271	739221	73,81
Zona Minera de Portovelo					
M1	Aguas termales	539	9590515	655897	19,22
M2	Río Amarillo	696	9590947	656011	50,87
M3	Puente río Amarillo	700	9591419	656291	72,67
M4	Puente de madera	688	9591133	656178	78,22
M5	Quebrada baja Zaruma	689	9590856	655892	85,77
M6	El Obrero	635	9588690	653112	5,52
M7	Río Amarillo junto al río Calera	597	9588153	651796	2,41
M8	Río Calera cerca de confluencia	602	9588371	651844	11,02
M9	Confluencia ríos Amarillo y Calera	581	9586847	651104	4,94

Figura 3 Localización de puntos de muestreo: A) Ponce Enríquez-Provincia del Azuay, B) Nambija-Provincia de Zamora Chinchipe, C) Portovelo-Provincia del Oro.

Portovelo

En el sector Portovelo, se colectaron 17 muestras de sedimentos. Del total de muestras analizadas por mercurio en los extractos del proceso de digestión, el contenido más alto de mercurio en sedimento corresponde a la muestra M17 con 398,21 $\mu\text{g}/\text{Kg}$ (Fig. 3C), mientras que el contenido más bajo es 1,18 $\mu\text{g}/\text{Kg}$, en la muestra M16. De los resultados resumidos en la Tabla 2, únicamente 3 muestras (M5, M12, M17) tienen contenidos de mercurio sobre los límites permisibles fijados por el TULAS (2003).

5 DISCUSION

5.1 Mercurio en el agua superficial de los sectores mineros estudiados

En Ponce Enríquez (Bella Rica), el contenido de mercurio más elevado está localizado en las aguas del río Siete con 47,88 $\mu\text{g}/\text{L}$ (M16, Fig. 2A). El río está ubicado en la parte más baja del lugar de estudio, por lo que las aguas de escorrentía que bajan desde las minas de Bella Rica pueden lavar los suelos y otros materiales sólidos que contienen trazas del mercurio utilizado en la amalgamación del oro. En la piscina de oxidación ubicada en la parte media de Bella Rica, la concentración de mercurio en el agua está en el rango de 4,66 a 7,62 $\mu\text{g}/\text{l}$. Notar que el contenido de mercurio en el agua de la piscina no es muy elevado, a pesar de que las colas de Hg generadas en el proceso de amalgamiento del oro son descargadas hacia las aguas residuales, las que luego son transportadas a la piscina. Se cree que las trazas de mercurio, probablemente fueron transferidas a la fase de gas debido a alta volatilidad del mercurio o fueron inmovilizadas por la reactividad manifiesta de los sedimentos. En la parte alta de Bella Rica (zona minera) los contenidos de mercurio disueltos en el agua son ligeramente superiores a los de la piscina de oxidación (6,78-8,68 $\mu\text{g}/\text{l}$). No obstante, de que en esta zona se lleva a cabo la amalgamación del oro con mercurio, el contenido del metal tóxico disuelto en el agua es bajo. La baja solubilidad del mercurio (60 $\mu\text{g}/\text{L}$) (Stumm y Morgan, 1996) y la tendencia del metal por interactuar rápidamente con las partículas sólidas de suelos y sedimentos, hace que su contenido en las muestras de agua sea bajo.

En Nambija, solamente una muestra de agua contiene mercurio sobre los 20 $\mu\text{g}/\text{L}$ (M6, Fig. 2B). En este punto existe una significativa perturbación de sedimentos, lo que puede provocar lixiviación del mercurio hacia el agua de la Quebrada Calixto. El resto de muestras presentan valores bastante bajos. La baja concentración de mercurio en agua puede estar ligada a la escasa actividad minera existente en la zona y al reemplazo del mercurio por cianuro para la recuperación de oro desde los materiales rocosos.

En el sector de Portovelo, la muestra de agua tomada en el río Calera junto a una descarga de aguas residuales que provienen de las canaletas, tiene el valor de mercurio más alto del sector (1812,5 $\mu\text{g}/\text{L}$) (M16, Fig. 2C). Este valor se explica porque en las canaletas se acumulan finos que contienen oro, los que posteriormente son amalgamados con mercurio. Las colas de la amalgamación pueden entonces fugar hacia la corriente acuosa y descargarse al río Calera. Esta hipótesis se confirma al cuantificar la concentración de mercurio en una muestra de agua proveniente de una canaleta (muestra M15 = 24,57 $\mu\text{g}/\text{l}$). El resto de muestras presentan concentraciones inferiores a 15 $\mu\text{g}/\text{l}$, de las cuales alrededor del

50% exhiben valores de mercurio bajo los permisibles para consumo humano y uso doméstico y preservación de la flora y fauna en aguas dulces (TULAS, 2003).

5.2 Mercurio en los sedimentos de los sectores mineros estudiados

En general los sedimentos contienen partículas sólidas activas que ligan e inmovilizan al mercurio en sus estructuras (Johannessen *et al.*, 2005). Aunque existen desacuerdos en cuanto a los mecanismos de movilidad del metal en sedimentos y suelos (Rasmussen, 1994; Fitzgerald *et al.*, 1998); sin embargo, las partículas sólidas de los sedimentos (materia orgánica y fracción inorgánica) retienen cantidades significativas de Hg. El mercurio en los sedimentos está principalmente en forma residual, como iones de intercambio, ligado a las sustancias húmicas y rara vez combinado con los carbonatos.

En Ponce Enríquez, el contenido más elevado de mercurio en sedimentos (440,76 $\mu\text{g}/\text{kg}$) está localizado en la orilla del río Siete (M13, Fig. 3A). Mientras que valores entre 30,16 y 257,48 $\mu\text{g}/\text{kg}$ se tienen en los sedimentos de la laguna de oxidación ubicada en la parte intermedia de Bella Rica. Las concentraciones de Hg encontradas en estos dos sitios, confirman la tendencia de que el contenido del metal en los sedimentos es mucho mayor que en el agua. En la presente investigación, la relación entre Hg en sedimentos y Hg en agua es mayor a 10. Sin embargo, ésta es menor a la encontrada en la zona minera aurífera (200 a 600) de la cuenca del río Tapajós, ubicada en la región amazónica brasileña (Telmer *et al.* 2006).

La concentración de mercurio en los sedimentos de las quebradas y río Nambija es similarmente mayor a la de otros sitios. Por ejemplo en el nacimiento del río Nambija, lugar donde se amalgama el oro con mercurio (M1, Fig. 3B), la concentración es 256,88 $\mu\text{g}/\text{kg}$ mientras que en el punto de muestreo M15, situado a aproximadamente 6500 m aguas abajo, la concentración desciende a 35,72 $\mu\text{g}/\text{kg}$. Este decrecimiento puede ser interpretado como que el mecanismo de inmovilización de mercurio, activa la transferencia del mercurio disuelto en el agua del río a los sedimentos, a medida que las aguas con trazas de mercurio avanzan. Esta afirmación se puede confirmar, analizando los datos de concentración de mercurio presentes en el agua del río Nambija. El punto M1 tiene mayor concentración (3,57 $\mu\text{g}/\text{L}$) comparado con la del punto M12 (0,46 $\mu\text{g}/\text{L}$) (ver Fig. 2B); sin embargo, se debe señalar que el aporte del agua proveniente de la Quebrada Calixto, puede provocar dilución de los contenidos de mercurio y consecuentemente disminuir su concentración en el agua en el río Nambija. Además, es importante notar que en los puntos de muestreo M15 y M16 (Fig. 3B), antes de la confluencia del río Nambija con el río Zamora, existen contenidos significativos de mercurio en los sedimentos (35,72 y 73,81 $\mu\text{g}/\text{kg}$, Tabla 2). En esta zona no hay ninguna actividad minera cercana y la concentración de mercurio disuelto en el agua en el mismo punto, es muy reducida (M13 = 0,57 $\mu\text{g}/\text{L}$, Tabla 1). Se cree que las significativas concentraciones de mercurio encontradas en los sedimentos del río Nambija, son debido a su transporte y redistribución durante las crecidas del río y las quebradas aledañas, las que arrastran abundantes sedimentos ricos en mercurio.

En Portovelo las más altas concentraciones de Hg, se presentan en los sedimentos del río Calera (83,59 – 398,21 $\mu\text{g}/\text{kg}$, Tabla 2). Esto se explica por el hecho de que el río recibe las aguas residuales provenientes del proceso de amalgamación con mercurio. Investigadores chinos reportan similares concentraciones de mercurio en los sedimentos del río Huangpu (70,52 $\mu\text{g}/\text{kg}$ - 387,30 $\mu\text{g}/\text{kg}$), que igualmente recoge aguas residuales de minas de oro que usan amalgamamiento con mercurio (Ding *et al.*, 2005). De igual forma, los sedimentos del río Amarillo contienen significativas concentraciones de Hg (50,87- 72,67 $\mu\text{g}/\text{kg}$) porque este río también es depositario de aguas residuales de las minas de oro de Zaruma, ubicadas aguas arriba. Comparando la concentración de mercurio en los sedimentos con la concentración del metal en las aguas de los ríos del sector, se confirma que muy son superiores, consecuentemente los sedimentos son materiales activos para inmovilizar el mercurio que es transportado por las corrientes acuosas superficiales.

6 CONCLUSIONES

Se puede concluir que las operaciones mineras que extraen oro con métodos tradicionales y con métodos sofisticados, son las responsables de las elevadas concentraciones de mercurio. Sin embargo, la fuente dominante de contaminación no solo es la pérdida de mercurio en el proceso de amalgamamiento, sino que la perturbación y movilización de grandes cantidades de sedimentos ricos en mercurio y las inundaciones provocadas por las operaciones mineras son también fuente de contaminación. Estos hallazgos cambian el enfoque que debería darse a los esfuerzos de remediación y prevención cambiando del control al mercurio en el sitio de uso, al control de la erosión de suelos y sedimentos. La minimización o eliminación de las pérdidas de mercurio en el proceso de minería son importantes para la salud de los habitantes y ambientes locales, pero el mantenimiento de los suelos y sedimentos confinados a su lugar sería una estrategia más efectiva para minimizar los flujos de mercurio a las microcuencas de los ríos.

- En distrito minero de Bella Rica (Ponce Enríquez), de las 16 muestras de agua analizadas, el valor más alto del contenido promedio de mercurio total corresponde a la M16 (Bella Rica-parte baja) con 47,88 $\mu\text{g/L}$. En cuanto a la concentración de Hg_T en los sedimentos el rango de concentración de Hg_T $\mu\text{g/kg}$ oscila entre 3,16 y 440,76 $\mu\text{g/kg}$.
- En Nambija de las 13 muestras analizadas, el valor más alto de concentración de Hg_T en aguas, corresponde a la muestra M6 (29,84 $\mu\text{g/L}$). En lo que respecta a los sedimentos la concentración de mercurio oscila entre 0,48 y 256,88 $\mu\text{g/kg}$.
- Para Portovelo de las 17 muestras de agua analizadas, el valor más alto de concentración promedio de Hg_T corresponde a la M 16 (Chanchas río Calera) con 1812,50 $\mu\text{g/L}$ mientras que para los sedimentos el rango oscila entre 1,18 y 398,21 $\mu\text{g/kg}$.
- En Ponce Enríquez, el contenido más elevado de mercurio en sedimentos (440,76 $\mu\text{g/kg}$) está localizado en la orilla del río Siete (M13). Mientras que valores entre 115,94 y 257,48 $\mu\text{g/kg}$ se tienen en los sedimentos de la laguna de oxidación ubicada en la parte intermedia de Bella Rica. En la presente investigación, la relación entre Hg en sedimentos y Hg en agua es mayor a 10.
- En Portovelo las más altas concentraciones de Hg, se presentan en los sedimentos del río Calera (83,59–398,21 $\mu\text{g/kg}$). Esto se explica por el hecho de que el río recibe las aguas residuales provenientes del proceso de amalgamación con mercurio. De igual forma, los sedimentos del río Amarillo contienen significativas concentraciones de Hg (50,87- 72,67 $\mu\text{g/kg}$) porque este río también es depositario de aguas residuales de las minas de oro de Zaruma, ubicadas aguas arriba.
- Probablemente las significativas concentraciones de mercurio encontradas en los sedimentos del río Nambija, se deben a su transporte y redistribución durante las crecidas del río y las quebradas aledañas, las que arrastran abundantes sedimentos ricos en mercurio.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaria Nacional de Ciencia y Tecnología (SENACYT) por el respaldo financiero a través del proyecto PIC-076. También, expresan su gratitud a los dirigentes y miembros de las cooperativas: Bella Rica de Ponce Enríquez y 11 de Julio de Nambija, por haber permitido realizar el trabajo de campo y tomar las muestras utilizadas en el estudio y al Sr. Marcelo Zúñiga por su ayuda con la elaboración de los mapas espaciales.

REFERENCIAS

1. Appleton J.D. (1996). Assessment of mercury contamination in the Ponce Enriquez artesian gold mining area, Ecuador. British Geological Survey – ODA.
2. Boyd, A.S., Seger, D., Vannucci, S., Langley, M., Abraham, J.L., y King, L.E. Jr. (2000). Mercury exposure and cutaneous disease. *J. Am.Acad. Dermatol.* 43, 1, 81-90.
3. Cavalleri, A., y Gobba, F. (1998). Reversible color vision loss in occupationally exposure to metallic mercury. *Environ. Res.Section A.* 77(2):173-177.
4. [Comité mixto FAO/OMS de expertos en aditivos alimentarios](#), 1999.
5. Counter, S.A., Buchanan, L.H., Ortega, F., y Laurell, G. (2002). Elevated blood mercury and neuro-otological observations in children of the Ecuadorian gold mines. *J. Toxicol. Environ. Health A.* 65, 2, 149-163.
6. Donoghue, A. M. (1998) Mercury toxicity due to the smelting of placer gold recovered by mercury amalgam *Occupational Medicine*, 48, 413-415.
7. [Ding, Z.H.](#); [Wang, W.H.](#); [Liu, C.E.](#); [Tang, Q.H.](#); and [Zhuang, M.](#) (2005). Distribution and species of mercury in water and sediments from Huangpu River, *Huan Jing Ke Xue*, 26, 5, 62-6.
8. Ellingsen, D.G., Bast-Pettersen, R., Efskind, J., y Thomassen, Y. (2001). Neuropsychological effects of low mercury vapor exposure in chloralkali workers. *Neurotoxicology.* 22(2):249-258.
9. Fitzgerald, W. F.; Engstrom, D. R.; Mason, R. P.; Nater, E. A. (1998). The case for atmospheric mercury contamination in remote areas. *Environ. Sci. Technol.* 32, 1, 1-7.
10. Hall, B. (1995). The gas phase oxidation of elemental mercury by ozone. *Water, air, and soil pollution.* 80, 1-4, 301-315.
11. Johannessen, S.; Macdonald, R.; and Magnuseek, K. (2005). Historical trends on mercury sedimentation and mixing in the Strait of Georgia, Canada, *Environ. Sci. Technol.*, 39, 4361-4368.
12. Lacerda, L. & Salomons, W. Mercury from Gold and Silver Mining: A Chemical Time Bomb, Editorial Springer. Germany. Pag-1146, 1998.
13. Metal Ions in Biological Systems: Mercury and its Effects on Environment and Biology. Volume 34. Editors A. Sigel and H. Sigel. Marcel Dekker Inc., New York, New York, 1997.
14. Millar, S. Informe Final de Evaluaciones de Riesgos del Derrame de Mercurio Ocurrido en el Norte del Perú, 2002.
15. Ozuah, P. O. (2001) [Folk use of elemental mercury: a potential hazard for children?](#) *Journal of the National Medical Association*, 93, 9, 320-322.
16. PRODEMINCA. Monitoreo Ambiental de las Áreas Mineras del Sur del Ecuador, MEM. Subsecretaría de Minas, 1998.
17. PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Evaluación Mundial sobre el Mercurio, Ginebra, Suiza, Junio 2005.
18. Rasmussen, P. E. (1994) Current methods of estimating atmospheric mercury fluxes in remote areas. *Environ. Sci. Technol.*, 28, 8, 13, 2233-2241.
19. Sandoval, S. La pequeña Minería en el Ecuador, Corporación Financiera Nacional ed. Manual de Evaluación Ambiental para Proyectos de Inversión, CFN, Química, 2001.
20. Stumm, W. and Morgan, J.J., E. Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters (John Wiley and Sons, Inc., New York, NY, 1196) "The Biogeochemical Cycling of Elemental Mercury", pp 664-667.
21. Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria del Ecuador. Libro VI, Anexo 1, 2003.
22. [Telmer, K.](#); [Costa, M.](#); [Simões A. R.](#); [Araujo, E.S.](#); and [Maurice, Y.](#) (2006) The source and fate of sediment and mercury in the Tapajós River, Pará, Brazilian Amazon: Ground- and space-based evidence. *J. Environ. Managem.*, 81, 2, 101-113.
23. Tirado, V., Garcia, M.A., Moreno, J., Galeano, L.M., Lopera, F., y Franco A. (2000). Pneuropsychological disorders after occupational exposure to mercury vapors in El Bagre (Antioquia, Colombia). *Rev. Neurol.* 31, 8, 712-716.
24. USEPA (US Environmental Protection Agency). National Primary Drinking Water Regulations. Federal Register, 1974.

25. USEPA (US Environmental Protection Agency). Water quality criteria: Notice of availability of water quality criterion for the protection of human health: methylmercury, Federal Register Environmental, 2001.
26. US Geological Service, Fact Sheet 146-00, October, 2000.
27. Zimmer, J., Grange, F., Straub, P., Haegy, J.M., y Guillaume, J.C. (1997). Mercury erythema after accidental exposure to mercury vapor. *Ann. Med. Interne (Paris)*. 148, 4, 317-320.

DIVERSIDAD Y USOS DE AVES DE BOSQUES RIBEREÑOS REMANENTES EN FINCAS DE SANTO DOMINGO DE LOS TSÁCHILAS

Wilmer E. Pozo R⁽¹⁾ & Andrés Eras M.⁽²⁾

⁽¹⁾Carrera de Ciencias Agropecuarias
Escuela Politécnica del Ejército
wepozo@espe.edu.ec

⁽²⁾Carrera de Ciencias Agropecuarias
Escuela Politécnica del Ejército

RESUMEN

En Ecuador son pocos los estudios de biodiversidad en paisajes fragmentados. Este trabajo, es pionero en proveer información sobre diversidad, abundancia y etnobiología de aves que frecuentan los bosques riparios en fincas ganaderas y agrícolas de Santo Domingo de los Tsáchilas. Se registró a las especies mediante captura, observación directa y rastros (sonidos). Se aplicó encuestas a propietarios de fincas, restaurantes y cazadores para conocer el uso de las aves. Se registraron 199 individuos de 36 especies de aves, (N=52, S=21 en fincas agrícolas y N=147, S=25 en ganaderas), con 10 especies comunes entre sistemas productivos; se determinó dos especies de aves en condiciones de amenaza de la UICN y/o CITES, mientras que cinco fueron indicadoras del ambiente, nueve paraguas, cinco bandera y cuatro migratorias de la época. La abundancia, diversidad, riqueza promedio e índices ecológicos, entre los tipos productivos de fincas no presentaron diferencias significativas. Miembros de la comunidad ornitológica registrada no dependen estrictamente de la presencia de bosques (53%), frente a aves de arboledos (47%). El 42% de finqueros le dieron uso y/o percepción a alguna o varias especies de aves. El 14.3% de aves fue utilizada como alimento y el 4.1% como ornamento/mascotas. El 4.08%, 6.12% y 20.41% de aves tuvieron la percepción cultural, de beneficio para el ganado y como plagas de cultivos respectivamente. Las especies cazadas de aves, nunca fueron vendidas en el área de estudio.

Palabras clave.- Bosque ripario, etnoornitología, occidente ecuatoriano, intervención antrópica

1.- INTRODUCCIÓN

El Ecuador es considerado como uno de los países con mayor diversidad biológica del planeta (Mittermeier et al. 1997), siendo el primero en biodiversidad por unidad de superficie (Ministerio del Ambiente EC. et al., 2000); por esta razón, las investigaciones sobre biodiversidad, se han visto plasmadas en importantes obras (Albuja, 1999; Ridgely & Greenfield; 2006; Tirira 2007). Sin embargo, este tipo de estudios, se limitan al estudio de la vida silvestre en áreas protegidas, restando importancia a remanentes de zonas naturales presentes en áreas alteradas como son los sistemas productivos (Pozo et al., 2006; Pozo & Cárdenas, 2008).

Investigaciones foráneas en zonas con intervención antrópica, han permitido conocer el papel que tienen en la conservación de la vida salvaje, ciertos hábitats de paisajes fragmentados, como cercas vivas, árboles dispersos en potreros y bosques ribereños o riparios (Estrada et al., 1993; Maisonneuve & Rioux, 2001; Deschênes et al., 2003; Cárdenas et al., 2004); comprobando que estos hábitats son refugios, corredores, sitios de anidación, reproducción, descanso y alimentación para la vida silvestre (Roth, 1976; Burel, 1996; Machtans et al., 1996; Maisonneuve & Rioux, 2001; Boutin et al., 2003; Deschênes et al., 2003).

A pesar de lo señalado, son pocas las investigaciones detalladas sobre la biodiversidad presente en paisajes fragmentados en toda América Latina y específicamente en el Ecuador (Pozo, 2004; Cárdenas et al., 2004). Últimamente, se han desarrollado investigaciones sobre el estado de conservación de especies silvestres en áreas productivas (Villacís et al., 2007; Pozo & Cárdenas, 2008; Pozo et al., 2008; Eras, 2008; Dávila 2009, Cárdenas et al. en prensa).

En Latinoamérica, se han ejecutados varios estudios sobre el uso dado por las personas a la flora y fauna (Mena, 1998). Vickers (1984), señala los estudios realizados con las étnias Siona-Secoya, Cofán y Huaorani (Vickers, 1981; Hames & Vickers, 1982; Yost & Nelly, 1983). Las investigaciones sobre los usos que comunidades indígenas ecuatorianas dan a los recursos naturales son muy comunes, como las realizadas en Sinangüé, Sucumbíos (Mena, 1997a; Mena, 1997b), en Playa el Oro (Benítez & Matheus, 1997), San Miguel (Benítez, et al., 1997), en Río Negro Chico (Gregory, 1997; Mena & Ruiz, 1997) en Esmeraldas y en San Venancio, Imbabura (Gregory, 1997; Mena & Utreras, 1997). Además se han desarrollado estudios etnozoológicos explícitos para determinar la importancia económica de especies en diferentes etnias y comunidades (Mena, 1996; 1998).

Como puede notarse, estudios etnobiológicos, en comunidades productivas agropecuarias ecuatorianas no existen (Mena et al., 1997), dejando de lado colectividades no indígenas, que usan los recursos disponibles de la naturaleza, estableciendo de este modo una importancia y conocimiento antropológico, que podrían perderse sin los aportes de trabajos como el presente realizado en Santo Domingo de los Táchilas – Ecuador (TSD).

La presente investigación es pionera, en lo que corresponde el estudio de la conservación de biodiversidad en hábitats fragmentados de sistemas productivos; se pretende proveer información sobre la diversidad, abundancia, riqueza y usos de aves silvestres, alojados en los bosques riparios de las fincas agrícolas y ganaderas del bosque muy húmedo Pre-montano (bmhPM) del Noroccidente ecuatoriano. Además, espera proporcionar información útil para sostener y promover producciones limpias o amigables con el ambiente; contribuyendo de este modo con el mantenimiento de los bosques riparios y, al control de la expansión de la frontera agrícola.

2.- MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La presente investigación se realizó en SDT la que se ubica entre los 500 a 700 m s.n.m., a 133 km de Quito; entre la latitud S 0° 20' / S 0° 0' y la longitud W 79° 30' / S 79° 0' (IGM, 2007). SDT presenta una precipitación media anual de 3 005 mm, humedad relativa promedio de 85,8% y temperatura media de 24,2°C con poca variación durante el día (INIAP, 2004).

La zona de vida del área de estudio es el Bosque muy húmedo Pre-Montano (bmhPM) (Cañadas, 1983), perteneciente al Piso Zoogeográfico Tropical Noroccidental (Albuja et al., 1980), con dos formaciones vegetales: la sabana formada principalmente por árboles dispersos en pastizales (Pozo & Cárdenas, 2008) y el bosque húmedo siempre verde del occidente ecuatoriano (Sierra et al., 1999), cuyos remanentes sobreviven como bosques riparios (Villacís et al., 2007; Pozo & Cárdenas, 2008).

Época de estudio

Los datos fueron tomados en la época lluviosa, puesto que la diversidad y abundancia de aves, son mayores que en la menos lluviosa (Mena, 1997a; 1997b). La mayor riqueza y abundancia de fauna en la época lluviosa, se debe principalmente a la abundancia de alimento; en dicha época se han

registrado especies de aves y mamíferos que han estado ausentes en la menos lluviosas (Gregory, 1997; Mena, 1997a; 1997b; Mena & Ruiz, 1997).

Diversidad de aves

Al azar se seleccionaron 6 fincas (3 agrícolas y 3 ganaderas), con remanentes de bosques nativos riparios (Tabla 1). Las salidas de campo se realizaron en seis meses consecutivos (de junio a noviembre del 2007); los periodos de monitoreos fueron 48 h mes⁻¹ (Pozo & Cárdenas, 2008; Cárdenas et al., 2004).

Tabla 1. Períodos de estudio y fincas monitoreadas, Santo Domingo de los Tsáchilas, 2007

Orden	Nombre de Finca	Tipo de Finca	Parroquia o Recinto	Fecha de Salida
1	Esperanza I	Agrícola	"Luz de América"	8 junio 2007
2	Esperanza II	Agrícola	"El Esfuerzo"	13 julio 2007
3	El Rancho	Ganadera	"Luz de América"	3 agosto 2007
4	Zoila Luz	Agrícola	"Luz de América"	20 agosto 2007
5	San Antonio	Ganadera	"km 35.5 "	19 septiembre 2007
6	Luís	Ganadera	"El Esfuerzo"	16 noviembre 2007

Las aves se colectaron con la ayuda de 4 redes de neblina de 6 m de longitud por 2.7m de alto y de 35mm de mesh. Las redes se colocaron a lo largo de un sendero de 200 m de bosque ripario, y fueron templadas entre las 5:00 y 10:00h y entre las 14:00 hasta 18:00h. Los monitoreos y capturas se realizaron en base de los patrones de actividad de las aves (Pozo & Cárdenas, 2008). Un representante de cada especie de ave capturada fue fotografiado de perfil, dorso y vientre e inmediatamente liberado, ningún ave fue sacrificada, ya que se pretendió fundamentar el criterio de conservación en los finqueros.

Se realizaron también recorridos de observación por finca, donde se reconocieron chillidos, gorgoteos, cantos y sonidos (Coopmans et al., 2004) los mismos que fueron guardados en cintas magnetofónicas, además se realizaron observaciones cuando las aves se posaron o levantaron vuelo con la ayuda de binoculares 10x40. Estos registros fueron bosquejados en una libreta de campo de escritura resistente al agua.

Se obtuvieron registros indirectos, por medio de encuestas a los propietarios de las fincas productivas, de especies que no se pudieron capturar, ni registrar en las salidas de campo y sus monitoreos; de estas aves también se detallaron bosquejos; estos registros no se incluyeron en el análisis estadístico pero sí en el etnobiológico.

Todas las especies registradas, se identificaron con la Guía de Campo de las Aves del Ecuador (Ridgely & Greenfield, 2006). Los registros auditivos, se identificaron por medio de la guía de audio de Aves del Occidente Ecuatoriano (Coopmans et al., 2004).

En 26 fincas se aplicaron encuestas sobre usos de aves para conocer los porcentajes de las especies más importantes según las utilidades y percepciones más comunes dadas.

Análisis de datos

Índices de biodiversidad de Margalef, Simpson, Shannon y Hill fueron utilizados (BIODIVERSITY PRO, 1997; Moreno, 2001), el diseño experimental fue un DCA, para aceptar o rechazar la hipótesis se utilizó las pruebas de Fisher con alfa menor o igual a 0,05 (INFOSTAT, 2006).

3.- RESULTADOS

Diversidad y abundancia de aves

En ambos sistemas productivos, se registraron 199 individuos, de los cuales 52 (26 %) se encontraron en fincas agrícolas y 147 (74 %) en fincas ganaderas. Estos individuos corresponden a 36 especies de aves; de estas especies 21 fueron registradas en fincas agrícolas y 25 en fincas ganaderas, siendo 10 comunes en ambos tipos de fincas (Porcentaje de similitud de Sorensen= 42,5 %).

En los dos tipos de sistemas productivos se registraron 8 órdenes, 16 familias y 36 especies. Los órdenes más abundantes en especies fueron Passeriformes (19), Apodiformes (5), Psittaciformes (3) y Columbiformes (3) (Tabla 2; Anexo A).

Tabla 1. Familias y órdenes de aves por cada sistema productivo de Santo Domingo, 2007.

Órdenes	Familias:	
	Fincas Agrícolas	Fincas Ganaderas
Apodiformes	Trochilidae	Trochilidae
Ciconiiformes	-	Ardeidae
Columbiformes	Columbidae	Columbidae
Cuculiformes	-	Cuculidae
Falconiformes	Accipitridae	-
Passeriformes	Emberizidae	Emberizidae
	Fringillidae,	Furnariidae
	Furnariidae	Hirundinidae
	Mimidae	Thraupidae
	Parulidae	Tyrannidae
	Thraupidae	Tyrannidae
Piciformes	Picidae	-
	Ramphastidae	Ramphastidae
Psittaciformes	Psittacidae	Psittacidae

Tabla 2. Número de familias y especies por órdenes de aves, en los dos sistemas productivos de Santo Domingo, 2009.

Órdenes	Familias	Especies
Apodiformes	1	5
Ciconiiformes	1	1
Columbiformes	1	3
Cuculiformes	1	1
Falconiformes	1	1
Passeriformes	8	19
Piciformes	2	2
Psittaciformes	1	3
Total*	16	35

*No incluye a un individuo registrado como desconocido

En las fincas agrícolas se registraron 6 órdenes con 13 familias, mientras que en las ganaderas se registraron 11 familias de 6 órdenes. Se encontraron en común 5 órdenes (Apodiformes, Columbiformes, Passeriformes, Piciformes y Psittaciformes) y 7 familias (Emberizidae, Furnariidae, Thraupidae, Tyrannidae, Psittacidae, Trochilidae y Ramphastidae) en ambos sistemas productivos (Tabla 2).

En las fincas agrícolas se registraron 20 especies con 50 individuos, de las cuales la más abundante fue *Sporophila corvina* seguida de *Pteroglossus erythropygius* y *Celeus loricatus*, las 17 restantes tuvieron una abundancia menor a 3 individuos (Figura 1).

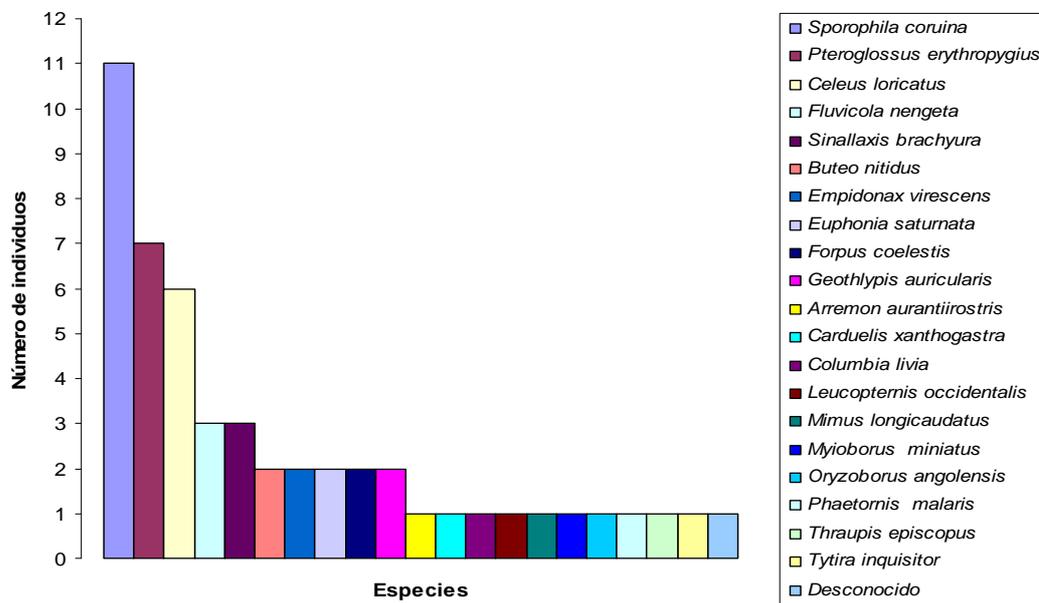


Figura 1. Ranking abundancia de especies de aves en bosques riparios de fincas agrícolas, Santo Domingo, 2009.

En las fincas ganaderas se registraron 148 individuos pertenecientes a 25 especies. *Bubulcus ibis*, *Pteroglossus erythropygius*, *Fluvicola nengeta*, *Sporophila corvina*, *Claravis pretiosa* y *Oryzoborus angolensis*, fueron las especies más abundantes, las 19 restantes especies presentaron una abundancia inferior a 10 individuos (Figura 2).

Las especies *Empidonax virescens*, *Fluvicola nengeta*, *Forpus coelestis*, *Leucopternis occidentalis*, *Oryzoborus angolensis*, *Phaetornis malaris*, *Pteroglossus erythropygius*, *Synallaxis brachyura*, *Sporophila corvina* y *Thraupis episcopus*, se encontraron tanto en las fincas agrícolas como en las ganaderas.

El ave cantante más evidente en las fincas productivas fue *Celeus loricatus* (Carpintero Canelo), su voz es muy distintiva, compuesta por un chillido ruidoso y seguido de un largo borboteo, <<scuiia! Klu-klu-klu-klu-klu-klu>> (Ridgely & Greenfield, 2006).

Nuevos registros

Durante este estudio se capturó dos individuos de *Phaetornis malaris*, en dos diferentes fincas, una de tipo agrícola y la otra ganadera. Con lo que se puede aseverar, que esta especie se encuentra tanto en las bajuras y estribaciones del este como en las bajuras del oeste, especialmente en SDT hasta los 1000 m s.n.m. (Pozo & Eras, 2007).

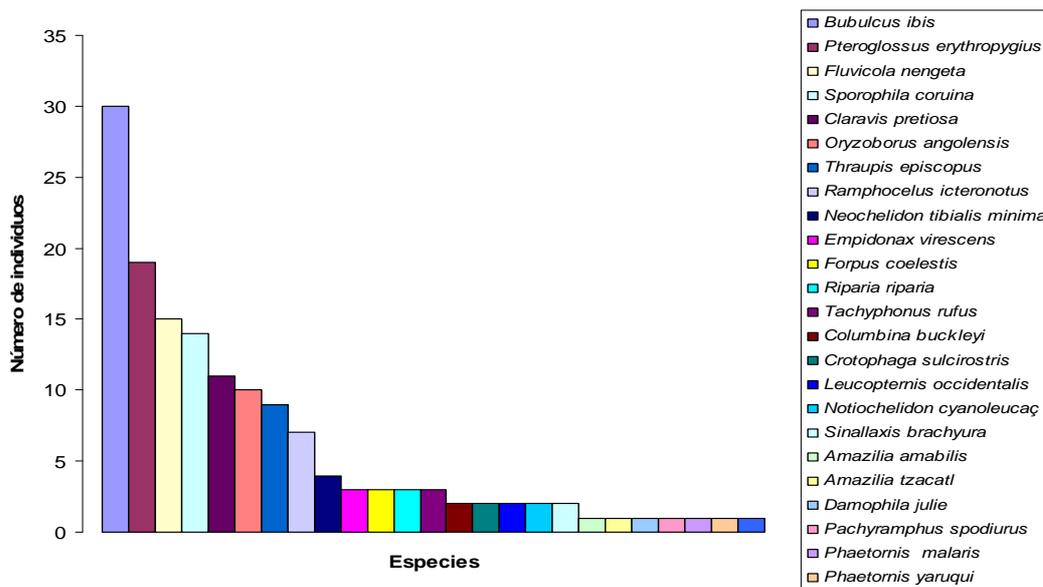


Figura 2. Ranking de abundancia de especies de aves en bosques riparios de fincas ganaderas, Santo Domingo, 2009.

Especies no capturadas

Los propietarios de las fincas encuestadas, señalaron la presencia de 7 especies registradas y, de 14 más que no se pudieron capturar ni observar en los monitoreos (Anexo C).

Especies en riesgo

Leucopternis occidentalis (Gavilán Dorsigrís) fue la única especie que se encuentra en la categoría <En Peligro> al igual que otras 15 especies en el Ecuador, lo que significa, que se encuentra en alto riesgo de extinción en la siguiente o próxima década; *Pachyramphus spodiurus* (Cabezón Pizarroso), se encuentra <Al Margen de Riesgo>, por lo tanto, a pesar de que no esté seriamente amenazada, su estado es preocupante, por lo que precisa de cuidados futuros (Ridgely & Greenfield, 2006).

Áreas endémicas para las aves registradas

Se determinó nueve especies pertenecientes a tres de los centros endémicos (Ridgely & Greenfield, 2006); cuatro especies endémicas a las <Bajuras de Chocó>, siendo esta el área comprendida por el anillo de bosque pluvial del Chocó (oeste de Colombia y noroeste de Ecuador); cinco especies del centro endémico <Bajuras Tumbesinas>, que se extiende desde el sur del Ecuador (Manabí y Los Ríos), hasta fragmentos al norte de Esmeraldas y el noroeste del Perú. *C. buckleyi* y *G. auricularis* fueron especies circunscritas a las <Bajuras tumbesinas>, y además al <Río Marañón> (Tabla 3).

Tabla 3 Especies registradas, pertenecientes a áreas endémicas suscritas al territorio ecuatoriano

Área endémica	Nombre Vulgar	Especie
Bajuras de Chocó	Loro Cachetirrosa	<i>Pionopssitta pulcra</i>
	Ermitaño Bigotiblanco	<i>Phaethornis yaruqui</i>
	Dios te dé	<i>Pteroglossus erythrogygius</i>
	Tucán del Chocó	<i>Ramphastos brevis</i>
Bajuras Tumbesinas*	Tortolita Ecuatoriana**	<i>Columbina buckleyi</i>
	Gavilán Dorsogrís**	<i>Leucopternis occidentales</i>
	Periquito del Pacífico**	<i>Forpus coelestis</i>
	Urraca Coliblanca**	<i>Pachyramphus spodiurus</i>
	Antifacito Lorinegro**	<i>Geothlypis auricularis</i>
Río Marañón	Tortolita Ecuatoriana	<i>Columbina buckleyi</i>
	Antifacito Lorinegro	<i>Geothlypis auricularis</i>

* Área endémica a la que pertenece SDT, ** Especies endémicas de SDT

Las áreas endémicas señaladas y sus límites, corresponden a las nueve propuestas por Ridgely & Greenfield (2006), las que son adaptaciones a las propuestas por el Directorio Global de Áreas Endémicas para las Aves (A Global Directory of Endemic Bird Areas, 1997) de Birdlife International.

Aves indicadoras, paraguas y banderas

Las especies consideradas como indicadoras del ambiente, fueron las aves endémicas del área de estudio (Gregory, 1997). SDT al encontrarse ubicado en el área endémica <Bajuras Tumbesinas> (Ridgely & Greenfield, 2006), presentó 5 especies indicadoras del ambiente (Tabla 3). Este centro endémico tiene 59 especies endémicas en total.

Accipiter superciliosus, *Buteo nitidus*, *Leucopternis occidentales*, *L. plumbea* y *Pteroglossus erythrogygius*, por su condición de rapaces, pueden ser consideradas tanto como paraguas como bandera (ANCON, 2002; Guerrero et al., 2006 Del Moral, 2007).

Además, como especies bandera, en vista de su atractivo y carisma, frente a la comunidad biológica, se pueden considerar a: *Phaethornis malaris*, por su nuevo registro territorial; a *Pionopssitta pulcra* y *Pionus chalcopterus*, por la importancia frente a la comunidad de SDT; y a *Ramphastos brevis* y *Pachyramphus spodiurus*.

Especies endémicas

La única especie endémica del Ecuador encontrada en las fincas productivas fue *Pteroglossus erythrogygius*, conocida generalmente como "Arasarí Piquipáldo" o "Dios Te Dé". Esta especie tiene un

ámbito hogareño bastante amplio a través de remanentes de bosques y arboledos del occidente ecuatoriano y pese a la declinación de sus poblaciones a causa de la deforestación, muestra una supuesta tolerancia a la fragmentación y destrucción de su hábitat, por lo aparentemente no se halla bajo amenaza.

Especies migratorias

A pesar, de que el Ecuador al situarse sobre la línea equinoccial, este distanciado de los hábitats de la mayoría de aves migratorias, ciertas especies visitan al país desde los cuatro puntos cardinales (Ridgely & Greenfield, 2006). En la presente investigación se registraron tres migratorias boreales y una austral (Tabla 4).

Tabla 4. Tipo, especies y condición de criaderas de las aves migratorias registradas, Santo Domingo, 2009.

Nombre científico	Nombre Vulgar	Tipo de Migratoria	Criaderas en el Ecuador
<i>Bubulcus ibis</i>	Garceta Bueyera	Boreal	Si
<i>Empidonax virescens</i>	Mosquitero Verdoso	Boreal localista	No
<i>Riparia riparia</i>	Golondrina Ribereña	Boreal (sep-nov; mar-abr)	No
<i>Notiochelidon cyanoleuca</i>	Golondrina Azuliblanca	Austral	Si

Las migratorias boreales, crían en el hemisferio norte y migran hacia el Ecuador durante el invierno del norte. Las migratorias australes, cría en el hemisferio sur y migran hacia el Ecuador. *B. ibis* al igual que *N. cyanoleuca*, a ciencia cierta cuenta con poblaciones migratorias como poblaciones criaderas en el Ecuador (Ridgely & Greenfield, 2006).

Localización de las especies

El 33 % de las aves inventariadas dependen totalmente de los bosques y remanentes del bosque muy húmedo Pie Montano; el 14% no dependen plenamente, ya que habitan tanto dentro como fuera de áreas boscosas; 38% (19 especies) dependen de los bosques fragmentados, fincas ganaderas y agrícolas; 4% de especies habitan netamente en bosques riparios y a lo largo de los ríos; 8% especies no viven ni dependen de los bosques y habitan en bosques secundarios y otros lugares; 8% son aves que habitan en zonas urbanas (poblados y casas) (Ridgely & Greenfield, 2006).

En definitiva, las comunidades de aves, mostraron una menor proporción de especies que dependen, facultativamente o estrictamente, de bosques y arboledos (23 especies, 47%); que de especies no dependientes en absoluto de bosque (26 especies, 53%), estas especies incluyen a especies generalistas, de zonas agrícolas, ganaderas, urbanas y fragmentadas (Figura 4).

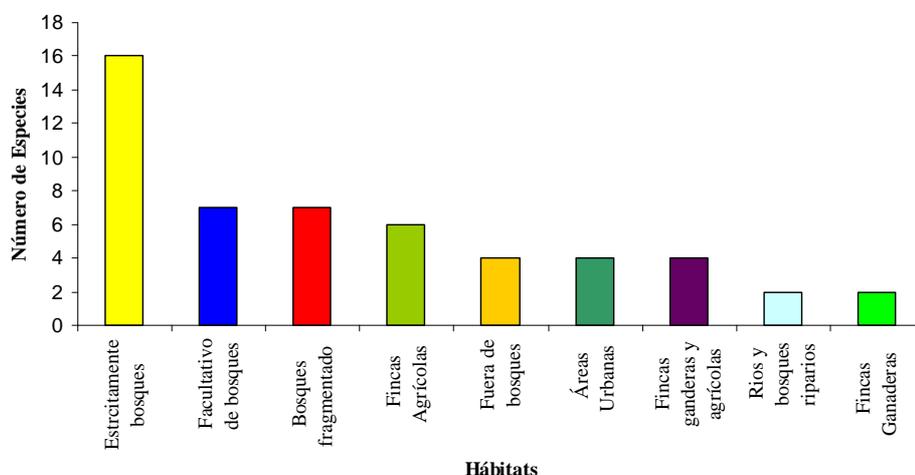


Figura 4. Distribución de las aves inventariadas por su localización (Adaptado de Ridgely & Greenfield, 2006), Santo Domingo, 2009

Abundancia de aves

Se hallaron en promedio 10.33 (± 1.98) especies y 7.43 (± 3.25) individuos por finca productiva. La mayoría de individuos presentes en los bosques riparios se concentraron en 9 especies de 7 familias, que representaron el 72.36% del total de individuos (Tabla 5). La garza (*Bubulcus ibis*), el arasarí (*Pteroglossus erythrogygius*) y el espiguero (*Sporophila corvina*) con 99 individuos representaron el 49.76% del total, las otras 6 especies restantes de la tabla 5 representaron 22.63%. Las restantes 26 especies fueron poco abundantes (Figuras 5 y 6).

Tabla 5. Especies más comunes de aves, nombre vulgar, familia, total de individuos y número de fincas con la especie, Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador, 2009

Nombre Vulgar	Especie	Familia	N	%	Fincas con la especie*
Garceta Bueyera	<i>Bubulcus ibis</i>	Ardeidae	30	15,08	1
Arasarí Piquipálido	<i>Pteroglossus erythrogygius</i>	Ramphastidae	26	13,07	4
Espiguero Variable	<i>Sporophila corvina</i>	Emberizidae	25	12,56	5
Tirano de Agua	<i>Fluvicola nengeta</i>	Tyrannidae	18	9,05	5
Tortolita Azul	<i>Claravis pretiosa</i>	Columbidae	11	5,53	1
Semillero menor	<i>Oryzoborus angolensis</i>	Emberizidae	11	5,53	3
Tángara azulejada	<i>Thraupis episcopus</i>	Thraupidae	10	5,03	3
Tángara lolilimón	<i>Ramphocelus icteronotus</i>	Thraupidae	7	3,52	2
Carpintero Canelo	<i>Celeus loricatus</i>	Picidae	6	3,02	3
Total			144	72.36	

* Número de fincas con las especie de 6 en total

La especie más abundante en las fincas agrícolas fue el Espiguero Variable (*Sporophila corvina*). En fincas ganaderas la Garza o Garceta Bueyera (*Bubulcus ibis*) fue la especie más abundante. El Dios-te-dé (*Pteroglossus erythropygius*) en ambos tipos de fincas productivas fue la segunda ave en abundancia.

Curvas de rango-abundancia de aves

Los 3 grupos abundancia proporcional (Pi) de las especies de aves registradas por sistema productivo se muestra en la tabla 6. Pi de las fincas agrícolas fue 0.048 (± 0.011) y la desviación estándar (ds) igual a 0.050, mientras que de las fincas ganaderas fue 0.040 (± 0.010) y ds= 0.048 respectivamente.

Tabla 6. Rangos de abundancia de las aves registradas en las fincas productivas, Santo Domingo, 2007.

Rangos de Abundancia		Fincas Agrícolas		Fincas Ganaderas	
		Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Abundante (A)	$x + 16/34(ds)$	1	0,0712	1	0,0628
Medianamente Abundante (MA)	X	0,0712	0,024	0,0628	0,0172
Poco Abundante (PA)	$x - 16/34(ds)$	0,024	0	0,0172	0

Las especies pertenecientes a cada rango de abundancia, por sistema productivo se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Especies por rangos de abundancia y por sistema productivo, Santo Domingo, 2009.

Rangos de Abundancia	Abundante (A)	Medianamente Abundante (MA)	Poco Abundante (PA)
Especies Fincas Agrícolas	<i>Sporophila corvina</i> <i>Pteroglossus erythropygius</i> <i>Celeus loricatus</i>	<i>Fluvicola nengeta</i> <i>Synallaxis brachyura</i> <i>Buteo nitidus</i> <i>Empidonax virescens</i> <i>Euphonia saturnata</i> <i>Forpus coelestis</i> <i>Geothlypis auricularis</i>	<i>Arremon aurantiirostris</i> <i>Carduelis xanthogastra</i> <i>Columbia livia</i> <i>Leucopternis occidentalis</i> <i>Mimus longicaudatus</i> <i>Myioborus miniatus</i> <i>Oryzoborus angolensis</i> <i>Phaethornis malaris</i> <i>Thraupis episcopus</i> <i>Tytira inquisitor</i>
Especies Fincas Ganaderas	<i>Bubulcus ibis</i> <i>Pteroglossus erythropygius</i> <i>Fluvicola nengeta</i> <i>Sporophila corvina</i> <i>Claravis pretiosa</i> <i>Oryzoborus angolensis</i>	<i>Thraupis episcopus</i> <i>Ramphocelus icteronotus</i> <i>Neochelidon tibialis</i> <i>Empidonax virescens</i> <i>Forpus coelestis</i> <i>Riparia riparia</i> <i>Tachyphonus rufus</i>	<i>Columbina buckleyi</i> <i>Crotophaga sulcirostris</i> <i>Leucopternis occidentalis</i> <i>Notiochelidon cyanoleuca</i> <i>Synallaxis brachyura</i> <i>Amazilia amabilis</i> <i>Amazilia tzacatl</i> <i>Damophila julie</i> <i>Pachyramphus spodiurus</i> <i>Phaethornis malaris</i> <i>Phaethornis yaruqui</i> <i>Pionus chalcopterus</i>

La abundancia proporcional (P_i) de las 21 especies registradas en las fincas agrícolas indicó que *Sporophila corvina*, *Pteroglossus erythropygius* y *Celeus loricatus* fueron las aves más abundantes (entre P_i 1 y 0.071). Entre las especies medianamente abundantes (entre P_i 0.071 y 0.024), se encuentran 7 *Fluvicola nengeta*, *Synallaxis brachyura*, *Buteo nitidus*, *Empidonax virescens*, *Euphonia saturnata*, *Forpus coelestis* y *Geothlypis auricularis*. Las aves menos o poco abundantes (entre P_i 0.024 a 0) fueron 10 especies (7).

La curva de las abundancias relativas (P_i) de las fincas ganaderas muestra que las únicas especies similares con las respectivas de las fincas agrícolas en este rango fueron *Pteroglossus erythropygius* y *Sporophila corvina*; con media abundancia *Thraupis episcopus* y *Empidonax virescens*, estuvieron en este rango de abundancia en ambos tipos de fincas productivas.

Porcentaje de similitud de especies de aves

Se determinó 43% de similitud de especies entre los dos tipos de fincas; lo que indica cualitativamente que de cada 10 especies de los bosques riparios 4 son comunes entre ambos tipos de sistemas productivos.

Entre fincas, los porcentajes de similitud, entre fincas agrícolas indica que de 10 especies de aves, alrededor de 2 aves fueron comunes; mientras que entre fincas ganaderas 3 de cada 10 especies de aves se encontraron en común.

Conservación de aves silvestres entre sistemas productivos

La riqueza ($p=0.4967$), la diversidad ($p=0.4501$) y la abundancia de aves, no presentaron diferencias significativas entre fincas agrícolas y ganaderas ($F_{1,4}= 1.59$, $p= 0.2757$, Tabla 8). A pesar, de que la curva de acumulación de especies (Figura 5) sugiere que las fincas ganaderas son las más diversas.

Tabla 8. Promedio (\pm Se), de Riqueza (S), abundancia (N) y diversidad de aves registradas en las fincas productivas y de acuerdo al sistema productivo, Santo Domingo, 2009.

Variables	Fincas Productivas (n=6)	Fincas Ganaderas (n=3)	Fincas Agrícolas (n=3)	CV (%)
Abundancia (N)	7.43 \pm 3.25	17.00 \pm 10.50a	49.33 \pm 23.10a	52.37
Riqueza (S)	10.33 \pm 1.978	7.43 \pm 3.25a	9.00 \pm 3.512a	26.26
Diversidad (H)	0.872 \pm 0.055	0.92 \pm 0.03a	0.83 \pm 0.11a	8.16

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$).

La curva de acumulación de especies de aves (Figura 5), indica que tanto en fincas agrícolas como en ganaderas, existió un progresivo aumento de las especies conforme aumentaban los individuos inventariados.

Las curvas no se saturan al finalizar el estudio, lo que indica que faltaron especies por ser registradas, y por ende al no llegar a ser horizontal faltan campañas de muestreo por sistema productivo.

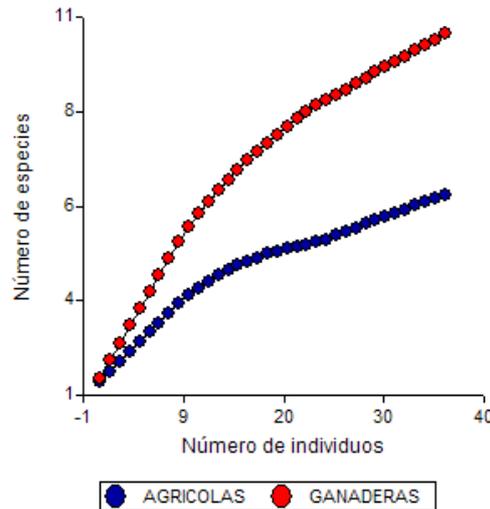


Figura 5. Curva de acumulación de especies de aves en los bosques riparios por sistema de productivo, Santo Domingo, 2009

De igual manera, no se observaron diferencias entre fincas ganaderas y agrícolas, en los índices de diversidad Simpson ($p= 0.4214$) y su recíproco ($p= 0.5647$), al igual que la abundancia reflejada a través de la Equitatividad ($p=0.3950$) y la riqueza expresada mediante el índice de Margalef ($p= 0.9307$) (Tabla 9).

Tabla 9. Promedio ($\pm Se$) de Índices de Simpson (D), Equitatividad (E), Margalef (D_{Mg}) y Recíproco de Simpson (D^{-1}) de aves, de acuerdo al sistema productivo, Santo Domingo, Ecuador, 2007.

Variables	Fincas Agrícolas (n=3)	Fincas Ganaderas (n=3)
Índice de Simpson (D)	0,07 \pm 0,22 ^a	0,11 \pm 0,03a
Índice de Equitatividad (E)	0,94 \pm 0,04 ^a	2,58 \pm 1,69a
Índice de Margalef (D_{Mg})	6,85 \pm 1,34 ^a	6,87 \pm 0,50a
Recíproco de Simpson (D^{-1})	15,17 \pm 3,32 ^a	12,06 \pm 5,22a

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$).

En consecuencia estadísticamente, no existieron diferencias entre la conservación de los bosques riparios de ambos tipos de producción, indicando una igual perturbación ecológica para las comunidades de especies de aves que habitan en dichos bosques.

Etnobiología de las aves

El 42% de los finqueros (11), le dieron uso y/o percepción a alguna o varias aves del inventario de este estudio, con lo que 24 especies de aves (49%), presentaron uno o varios usos/percepciones

(Figura 6). Ninguna especie de ave ha sido comercializada por los propietarios de las fincas productivas después de ser cazada.

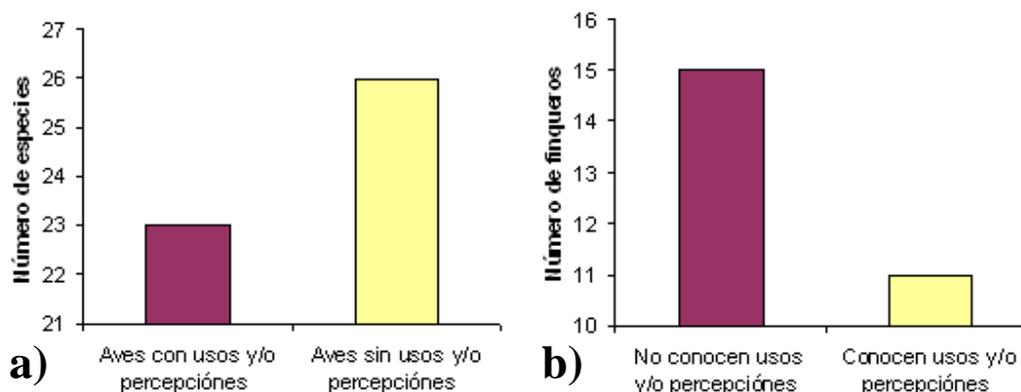


Figura 6. a) Especies de Aves registradas con usos y/o percepciones. b) Finqueros que conocían usos y/o percepciones a aves, Santo Domingo, 2007.

Usos de las aves

Los usos determinados para ciertas aves se restringieron al de alimento y el de ornamento o mascotas tan solo 9 especies se enmarcaron con estas utilidades, representando el 22.4% del total de especies inventariadas y el 52.38% de especies con un uso y/o percepción.

Las especies de aves que poseen utilidad se resumen en la Tabla 10. *Pionopssitta pulchra* y *Pionus chalcopterus*, son especies susceptibles de ser cazadas como mascotas, ya que se conoce que los Tsáchilas (Indios colorados) las persiguen por este motivo, sin embargo esta **información no se obtuvo de los finqueros de la zona, por esta razón, no se los incluyó en el análisis etnobiológico de datos.**

Tabla 10. Especies de aves con utilidad para los finqueros de la zona. Santo Domingo, 2007.

Nombre Vulgar	Especie	Usos
Azulejo	<i>Thraupis episcopus</i>	Ornamento
Loro alibronceado	<i>Pionus chalcopterus</i>	Alimento
Loro/perico	<i>Pionopssitta pulchra</i>	Alimento
Paloma	<i>Columba subvinacea</i>	Alimento
Paloma	<i>Columbia livia</i>	Mascota
Perdiz	<i>Geotrygon montana</i>	Alimento
Periquito del pacífico	<i>Forpus coelestis</i>	Alimento, Ornamento
Tortolita Ecuatoriana	<i>Columbina buckleyi</i>	Alimento
Tucán	<i>Ramphastos brevis</i>	Alimento

Las especies destinadas como ornamento en SDT, fueron *Thraupis episcopus*, *Columbia livia* y *Forpus coelestis*.

Percepciones de las aves

Veinte y dos especies tuvieron una o varias percepciones, representando el 42% del total de especies registradas y el 92% de las especies con uso y/o percepción (Tabla 11 y 12).

Tabla 11. Percepciones, número y porcentaje de especies de aves con percepciones y porcentaje del total de aves inventariadas, Santo Domingo, 2007.

Percepciones	Número de especies	% de las especies con uso/percepción (S=24)	% del total de especies (S=49)
Cultural	7	29,17	4,08
Beneficiosas para el ganado	3	12,5	6,12
Rapaces	4	16,67	8,16
Enfermedades al ganado	3	12,5	6,12
Plagas	10	41,67	20,41

El Tirano Enmascarado o Dominicano (*Fluvicola nengeta*), fue uno de los más comunes visitantes de las áreas construidas y frecuentemente habitadas por el hombre dentro de las fincas productivas; por esta razón, las personas de las relacionadas con las fincas se han acostumbrado a su presencia, por su atractivo y por la falta de temor frente a la presencia del hombre, tanto así, que se lo encuentra en parejas o solitario alimentándose en los pisos de dichas construcciones.

Tabla 12. Aves con percepciones de finqueros. Santo Domingo, 2009.

Nombre Vulgar	Especie	Percepciones
Águila	<i>Accipiter superciliosus</i>	Rapaces
Tangará azulejada	<i>Thraupis episcopus</i>	Plaga
Espiguero Variable	<i>Sporophila corvina</i>	Plaga
Eufonía coroninaranja	<i>Euphonia saturata</i>	Plaga
Gallinazo	<i>Sarcoramphus papa</i>	Perjudicial para el ganado
Garceta Bueyera	<i>Bubulcus ibis</i>	Beneficioso y perjudicial para el ganado
Garrapatero	<i>Crotophaga sulcirostris</i>	Beneficioso para el ganado
Garza	<i>Butorides striatus</i>	Perjudicial para el ganado
	<i>Leucopternis</i>	
Gavilán Dorsigrís	<i>occidentalis</i>	Rapaces
Gavilán	<i>Leucopternis plumbea</i>	Rapaces
Gavilán Gris	<i>Buteo nitidus</i>	Rapaces
Golondrina	<i>Notiochelidon</i>	
Azuliblanza	<i>cyanoleuca</i>	Plaga
Jilguero Ventriamarillo	<i>Carduelis xanthogastra</i>	Plaga
Loro alibronceado;	<i>Pionus chalcopterus</i>	Cultural
Loro/perico	<i>Pionopssitta pulchra</i>	Cultural
Mosquitero verdoso	<i>Empidonax virescens</i>	Plaga
Paloma	<i>Columba subvinacea</i>	Plaga
Perdiz	<i>Geotrygon montana</i>	Plaga
Ranchero	<i>Molothrus bonariensis</i>	Beneficioso para el ganado
Tángara filiblanca	<i>Tachyphonus rufus</i>	Plaga
Tortolita Ecuatoriana	<i>Columbina buckleyi</i>	Plaga

La importancia cultural de *Pionus chalcopterus* y *Pionopssitta pulchra* en la cosmovisión de los Tsáchilas y ciertos finqueros, fue un aspecto trascendental determinado. Esto se puede deber a la gran abundancia y el constante contacto que la comunidad posee con ellas. Se conoció, que *P. chalcopterus* tiene un gran importancia para los Tsáchilas, en tal virtud, hasta se lo encuentra en uno de los monumentos más importantes del centro de la ciudad (Figura 7).



Figura 7. *Pionus chalcopterus* en monumento a los Tsáchilas (zona urbana de SDT). *P. chalcopterus* se observa en el antebrazo de un nativo (Foto: A. Eras, 2007).

Método de cacería de las aves

Los habitantes asentados y que concurren en las fincas productivas SDT, que han cazado aves silvestres, en su totalidad lo han realizado "sellándolos" (término que los pobladores de SDT atribuyen al uso de escopetas, carabinas y armas de fuego en general, en actividades de cacería), señalando que es lo más práctico si se busca alimento; sin embargo, se desconoce el método de caza para la especie *Forpus coelestis*, *Pionopssitta pulchra* y *Pionus chalcopterus* las mismas que se pueden destinar como mascotas.

4.- DISCUSIÓN

Diversidad de aves

Hasta ahora se desconoce estudios faunísticos en áreas fragmentadas de SDT, por lo que este inventario permite conocer más sobre el estado de conservación de los remanentes del bosque muy húmedo Premontano del occidente ecuatoriano (Anexo A). Este catálogo provee pautas para que parabiólogos y científicos hagan futuros monitoreos en zonas fragmentadas, especialmente en SDT.

Comparando este estudio con investigaciones hechas en áreas protegidas, las cuales se han concentrado en varias localidades por períodos más extensos y con la participación de varios investigadores, la riqueza de STD (49 especies) es relativamente baja; En Sinangüé (Reserva Ecológica Cayambe-Coca, Sucumbíos) con idéntica zona de vida o formación vegetal, se encontraron 278 especies (Mena, 1997b); en Playa el Oro (Reserva Ecológica Cotacachi-Cayapas) se registraron 148 especies (Benítez & Matheus, 1997), sin embargo, es lógico que una zona alterada y fragmentada tenga menos diversidad de especies silvestres.

En otros bosques riparios de fincas ganaderas como los de Matagalpa, Nicaragua, se encontraron 74 especies de aves (Pérez et al., 2006), siendo más ricos, comparadas con los bosques

riparios de fincas productivas en SDT. De igual manera, la diversidad se puede considerar baja con relación a un estudio en Cañas, Costa Rica, donde se registró 29 familias con 80 especies en la totalidad de un paisaje fragmentado (Cárdenas et al., 2004), sin embargo, en la citada investigación se caracterizaron las aves de varios hábitats (fragmentos de bosque seco, bosques riparios, chárrales, cercas vivas y potreros), siendo realmente la riqueza de los bosques riparios de 39 especies, lo que indica los bosques fragmentados del trópico ecuatoriano tienen aparentemente mayor biodiversidad, sin que esto signifique mayor o menor alteración del área, lo que refleja la gran diversidad de aves presentes en Ecuador (Ridgely & Greenfield, 2006).

La mayor o menor diversidad que presenta una finca al momento de realizar los registros pudo estar influenciada por las condiciones climáticas, distancias recorridas, esfuerzo de monitoreo, facilidades del terreno y características de los senderos, a pesar de que se realizó las actividades de monitoreos lo más homogéneamente posible, con el fin de que los datos representen exactamente la diversidad y abundancia de las mismas. Puesto, que las salidas de campo fueron planificadas previamente a su ejecución, no se pudo escoger condiciones uniformes para todos los monitoreos, cumpliendo de este modo las fechas preestablecidas, siendo este uno de los factores que se infiere como el que más pudo afectar la diferencia de registros. Es probable que en futuros trabajos se muestre mayor diversidad basados en uniformizar los factores previamente señalados.

La precipitación pluvial característica de la época de estudio, pudo haber afectando los resultados de diversidad, ya que existe una menor movilidad de animales frente la presencia de lluvias. Las posibilidades de avistamiento de las aves, también pudo afectar negativamente los datos de diversidad y abundancia (Mena, 1997b).

Los órdenes con mayor riqueza en los bosques riparios de las fincas productivas fueron Passeriformes (19), Apodiformes (5), los Psittaciformes (3) y Columbiformes (3); estos datos, son similares a los obtenidos, en estudio realizado en el bmhPM, con la única diferencia de haberlos obtenido en una área protegida (Reserva Ecológica Cayambe-Coca), donde los órdenes más abundantes fueron Passeriformes, Piciformes, Apodiformes y Psittaciformes (Mena, 1997b). Los órdenes que difieren entre estas dos investigaciones son Piciformes y Columbiformes. El orden Piciformes en el actual inventario ocupó uno de los últimos lugares en diversidad de especies, lo que indica que puede ser uno de los más afectados frente a la alteración de los ecosistemas locales. El orden Columbiformes fue más abundante frente a la citada publicación, sin embargo, no se le puede atribuir ninguna relación con la alteración de los bosques nativos, ya que su alta abundancia se debe principalmente a la preferencia que tienen sus especies por las zonas ribereñas y los bosques riparios.

Los Passeriformes, Apodiformes y Psittaciformes tuvieron la misma tendencia de abundancia en ambos estudios, por lo cual se supone que estos a pesar de enfrentar los mismos desafíos ambientales son los que más se han adaptado a los cambios del medio, sin que esto signifique que dichas alteraciones no los hayan afectado, ya que, muestra clara de este trastorno, es la diferencia de riqueza que se presenta entre los paisajes agrícolas-ganaderos ($S=49$) de la misma zona de vida frente el área protegida ($S=74$) (Pérez et al., 2006; Pozo & Eras, este estudio).

No obstante, en estudios previos de avifauna del Ecuador, los órdenes Passeriformes y Apodiformes, son más abundantes en el occidente ecuatoriano, independientemente de la zona de vida: en la Cordillera de Toisán, Imbabura (Bosque muy húmedo Montano bajo) (Gregory & Vaca, 1994); en la Playa de Oro (Bosque muy húmedo Tropical) y Río Negro Chico (Bosque húmedo Tropical), Zona de Amortiguamiento de la Reserva Ecológica Cotacachi Cayapas, Esmeraldas (Benítez & Matheus, 1997; Gregory, 1997); en San Venancio, Esmeraldas (Bosque húmedo Montano bajo) (Gregory, 1997).

Esto no permite apreciar diferencias entre zonas alteradas y áreas protegidas. Sin embargo, en las citadas publicaciones realizadas en áreas protegidas, el orden Piciformes se presentó en tercer lugar en abundancia, por lo tanto, se puede inferir que es un orden sensible frente a las alteraciones ambientales.

Bubulcus ibis, *Pteroglossus erythropterus*, *Claravis pretiosa* y *Thraupis episcopus* se las observó en grupos, en tal virtud se las registró en números altos, por lo que se presentan en los inventarios con una alta frecuencia. El número de individuos de estas especies fue mayor, a pesar del menor número de observaciones realizadas.

El encontrar nuevas distribuciones de especies de aves no es frecuente, sin embargo, no es insólito, ya que las distribuciones cambian con el tiempo (Ridgely & Greenfield, 2006). Es probable que *P. malaris* no fuera registrada con anterioridad, debido a que la mayoría de registros se han realizado en áreas protegidas, dejando de lado áreas alteradas, siendo estos últimos, sitios potenciales de conservación y alojamiento de aves silvestres (Estrada et al., 1993; Pozo, 1994; Harvey et al., 2005; Pozo & Eras 2007).

Leucopternis occidentalis y *L. plumbea*, se encuentran bajo amenaza en el Ecuador, debido a la presión de cacería, otras formas de persecución directa por ser rapaces diurnas de aves domésticas. Además, al ser especies paraguas, son más sensibles que otras especies, a la destrucción de su entorno, la pérdida de hábitat y a la caza excesiva (Pozo et al., 2006).

De las 14 especies endémicas del Ecuador se inventarió a *Pteroglossus erythropterus*, en ambos sistemas productivos con una categoría de abundante, lo cual indica, que pese a sus poblaciones bajas y distribución limitada, es una de las pocas especies endémicas del país, que aparentemente no se encuentra bajo amenaza de conservación (Ridgely & Greenfield, 2006); posiblemente, porque a través del tiempo ha tolerado bien los disturbios de su ecosistema, lo que se confirma con su registro en ambos sistemas productivos. Los bosques riparios son indispensables para esta especie dentro de áreas fragmentadas, ya que, si bien tolera la pérdida de su hábitat, no puede vivir sin áreas boscosas (Ridgely & Greenfield, 2006).

Las especies endémicas de SDT (centro endémico "Bajuras Tumbesinas"), pueden indicar la alteración de la zona (Gregory, 1997). En tal virtud, se puede inferir que las fincas ganaderas fueron menos alteradas con relación a las agrícolas, ya que tuvieron más especies endémicas (*Columbina buckleyi*, *Leucopternis occidentalis*, *Forpus coelestis* y *Pachyrhamphus spodiurus*) frente a las fincas agrícolas (*L. occidentalis*, *F. coelestis* y *Geothlypis auricularis*).

Para conocer, realmente cual es la alteración que tienen los bosques riparios de SDT, como zona fragmentada, es necesario comparar la mayor dominancia de las especies de acuerdo a los valores de abundancia proporcional (P_i), con un inventario similar en bosques no alterados de la zona, determinando así, la presencia de ciertas especies como indicadores del ambiente (Benítez et al., 1997).

Es la primera vez que en el Ecuador se registra a *Columbina livia* en los bosques riparios de las fincas productivas (Ridgely & Greenfield, 2006) lo que indica la proximidad, que las áreas ocupadas por el hombre tienen con las fincas productivas y los bosques riparios, reflejando la magnitud de la fragmentación del paisaje.

Las curvas de dominancia-diversidad de aves son muy parecidas en ambos tipos de sistemas productivos; las mismas que presentan lo que Odum (1986) denomina curva tipo C, es decir un patrón sigmoideo intermedio. Esto indica diferenciación y superposición de nichos; al ser un sistema abierto, las aves coexisten en condiciones de competencia parcial, más no directa, puesto que sus adaptaciones promueven la diferenciación de nichos, sin embargo, no se excluye hábitats por competencia. La curva tipo C, es modelo más adecuado para comunidades sin mayores alteraciones (Odum, 1986; Benítez et

al., 1997), por ende, se puede inferir que las comunidades biológicas de las fincas agrícolas como ganaderas relativamente no se encuentran altamente perturbadas. Cuando las perturbaciones son sutiles, y tan solo reducen el acceso a los recursos alimenticios o los sitios para anidar, y dependiendo de las características de las comunidades, la redistribución de los organismos después de la perturbación, no necesariamente refleja un efecto negativo (Rossetti & Giraud, 2003), puesto que el nuevo patrón impuesto de distribución puede ser temporal. Después de un tiempo los animales pueden volver a su distribución original para explotar el remanente de los recursos (Gill et al., 1996), a pesar de que sus poblaciones hayan decrecido.

El índice de Simpson concede mayor importancia a las especies comunes, indicando de este modo la aglutinación de dominancia de una o pocas especies, mientras que el índice de Shannon concede mayor importancia a las especies raras (Odum, 1986; Benítez & Matheus, 1997). Los índices de Shannon y Simpson, fueron significativamente iguales para los dos tipos de fincas, reflejándose en que las especies raras o poco abundantes y las comunes tuvieron un patrón de posición parecido.

Etnobiología de las aves

Bubulcus ibis), fue una especie de ave con una percepción muy polar por parte de los finqueros, ya que fue considerada como transmisora de enfermedades al ganado y como beneficiosa para el mismo, esta última, en virtud de que se alimenta de sus insectos perjudiciales. La realidad es que *B. ibis* se alimenta de insectos espantados por las vacas, siendo realmente plagas de plantaciones de banano, ya que gustan de esta fruta (Ridgely & Greenfield, 2006).

Pteroglossus erythropygius), es una ave que se alimenta de frutas, lagartijas, huevos de aves y hasta crías, siendo esta una rapaz más de SDT (Ridgely & Greenfield, 2006), mas no es percibida de este modo por los finqueros.

Ninguna ave ha sido cazada dentro de las fincas analizadas. Esto se debe, a que cualquier mamífero susceptible de caza, proporciona más carne por bala que una ave, por lo que son preferidos por los cazadores (Gregory, 1997). La no cacería de aves, muestra que la presión de cacería a diferencia de la pérdida de hábitat, no es un problema que afecte la diversidad ornitológica de SDT, a pesar de que ciertos finqueros perciben notoriamente que los Columbidae son susceptibles de ser cazadas como alimento. Probablemente no se cazan aves en este sector, porque las pavas grandes (Cracidae), en el occidente ecuatoriano nunca han sido abundantes, conociendo solo la existencia de *Penelope purpurascens* en dicha área del Ecuador (Ridgely & Greenfield, 2006).

Los bosques riparios dentro de las fincas productivas, presentaron relativamente poca diversidad, pero excelentes indicios de conservación, que en teoría no se esperaban, pues se encontró a una de las 14 especies de aves endémicas del Ecuador, en los dos sistemas productivos estudiados (*Pteroglossus erythropygius*); al igual que *Columbina buckleyi*, *Forpus coelestis*, *Leucopternis occidentales* y *Pachyramphus spodiurus*, como indicadoras de buen ambiente; como bandera a *P. spodiurus*, *Phaetornis malaris*, *Pionopsitta pulcra*, *Pionus chalcopterus* y *Ramphastos brevis* tanto como bandera y paraguas a *Accipiter superciliosus*, *Buteo nitidus*, *L. occidentales*, *L. plumbea* y *P. erythropygius* (Gregory, 1997; Mena & Ruiz, 1997; Mena & Utreras, 1997; Mena, 1997; ANCON, 2000; Guerrero et al., 2006; Del Moral, 2007; UICN, 2006).

La conservación de una comunidad biológica, depende de la estructura poblacional y específica de las especies que la conforman; el encontrar las señaladas especies "focales" (paraguas, clave, indicadoras y bandera), en vista de su carácter articulador de la comunidad biológica, su gran

importancia dentro del ecosistema (al mantener el equilibrio de un amplio rango de plantas y animales), su atractivo frente a la colectividad de seres humanos y el alto grado de amenaza que enfrentan, permite sostener que las alteraciones de la comunidad biológica de los bosques riparios, no han sido de gran magnitud.

Esto brinda buenas perspectivas de conservación, ya que emprendiendo un arduo trabajo con los finqueros, se aumentaría y mantendría los remanentes de bosques nativos dentro de sus fincas, con lo que se puede ampliar las subpoblaciones de especies silvestres; que en base del concepto de metapoblación (Suárez, 1998), dichas poblaciones pequeñas (de cada especie), podrían ser manejadas como una sola población, cuyo tamaño colectivo puede ser suficientemente grande como para permitir su persistencia a largo plazo (Hanski & Gilpin, 1991; Suárez, 1998).

Esta propuesta de manejo, bajo el sistema de "metapoblación" (Hanski & Gilpin, 1991; Suárez, 1998), propone, incrementar y mantener los remanentes boscosos entre fincas adyacentes, consecutivas y cercanas, para que las poblaciones pequeñas locales (subpoblaciones) de estos bosques remanentes, interactúen a través de los individuos que se movilizan entre dichas poblaciones, lo que implica que todas estas subpoblaciones sean manejadas como una sola población.

Para aumentar la conservación de especies silvestres de los bosques riparios, frente a la real alteración que sufre el paisaje, se debe fomentar esquemas de protección y restauración de los corredores riparios (todas aquellas áreas boscosas fluviales conectadas, que disminuyen el aislamiento entre islas hábitats) manteniendo la conectividad biológica entre las fincas, en las cuales se promueva en los productores la regeneración e incremento del área forestal (Gordillo et al., 2006), creando "hábitats temporales" y "permanentes" para estas especies (Burel 1996; Harvey et al., 2005).

No obstante, el creer ciegamente en uno de los dos polos que han caracterizado a la comunidad agrobiológica, es decir, o bien la producción de alimentos sin que importe la ecología, o bien la conservación de la naturaleza sin que importe la alimentación humana, fomenta el actual esquema inmanejable de producción, donde la posible y bien fundamentada sostenibilidad no es tomada en cuenta, siendo la falta de consensos, el primer problema causante de la imparable fragmentación y pérdida de bosques nativos (Obs. pers.). Esta sostenibilidad, se entiende como la utilización de la diversidad biológica de un modo y a un ritmo que no ocasione su disminución en el largo plazo, manteniendo las posibilidades de satisfacer las necesidades y aspiraciones de las generaciones actuales y futuras (Mena et al., 1997).

Una alternativa frente al estilo de desarrollo –irracional y depredador-, como el implementado en la Amazonía y Costa ecuatoriana causa irreversible de la fragmentación de los bosques nativos (Suárez, 1998), es el fomento del manejo de vida silvestres en cautiverio y semicautiverio, en áreas sin alteración, en las cuales con una considerable cantidad de terreno se puede producir de manera extensiva, explotando al mencionado recurso al ritmo de su reproducción natural (Tapia, 1998). El agroturismo es otra alternativa para mejorar la calidad de vida de las personas principalmente rurales (Pozo & Cárdenas, 2008). El agroecoturismo puede nacer en SDT, en búsqueda de opciones para una mayor productividad de las tierras, con cierto carácter turístico, en vista de la gran cantidad de movimientos "ecoturísticos" que giran a sus alrededores (Arrieta, 2000).

Con el agroturismo se mantiene los hábitats naturales y la comunidad biológica que la reside, en perspectiva de los grandes beneficios económicos y sociales derivados de su uso sostenible (Pozo & Cárdenas, 2008). Esta alternativa, comprende el turismo en áreas agropecuarias, en las cuales se aprovecha el medio ambiente rural, ocupado por una sociedad autóctona, que muestra y comparte no solo su idiosincrasia y técnicas agrícolas, sino también su entorno natural protegido, sin embargo, solo se puede promover en base de la protección y uso sostenible de los recursos, con fundamentos de consciencia ecológica en la idiosincrasia de las personas (Arrieta, 2000)

La inexistencia de un mercado y forma de comercialización de aves, sugiere que no se las altera incidentalmente. En tal virtud, una actividad importante y positiva aplicable a SDT, que se está desarrollando en el Ecuador desde hace unas pocas décadas es el ecoturismo y el agroecoturismo, enfocada principalmente en las aves, pues es el grupo de entre los organismos vivos más popular globalmente (Ridgely & Greenfield, 2006), siendo muy importante en el área continental y más aún en Galápagos; por esto, el aviturismo es una de las alternativas que impactarán positivamente los ecosistemas no solo de áreas protegidas sino de paisajes fragmentados, como el de SDT

5.- CONCLUSIONES

Se reconocieron 36 especies de aves (21 en fincas agrícolas y 25 fincas en ganaderas), con 199 individuos (26% en agrícolas y 74% en ganaderas), pertenecientes a 8 órdenes y 16 familias. Los órdenes con mayor riqueza fueron Passeriformes, Apodiformes, Psittaciformes y Columbiformes. Las especies más abundantes fueron: el Espiguero Variable (*Sporophila corvina*) (12.6%) en agrícolas y, Garza (*Bubulcus ibis*) (15.1%) en ganaderas. *Phaethornis malaris* (Colibrí ermitaño) habita en el occidente ecuatoriano como nuevo registro. El 47% de aves dependen, facultativamente o estrictamente de bosques y arboledos, mientras que el 53% no dependen en absoluto de bosque.

Los promedios de riqueza (S), diversidad (H') y la abundancia (N), al igual que los índices ecológicos de diversidad Simpson, su recíproco, equitatividad y Margalef, no presentaron diferencias estadísticas entre los bosques riparios de los sistemas productivos propuestos. Esto muestra iguales niveles de perturbación ecológica para las comunidades de especies que habitan en los bosques.

Existió un evidente y progresivo aumento de especies conforme aumentaban los individuos inventariados. Sin embargo, se observó y en base de las curvas de acumulación de especies, que faltaron especies por ser registradas, y por ende campañas de muestreo por sistema productivo.

El 42% de finqueros le dieron uso y/o percepción a alguna o varias especies de aves. El 49 % de las aves, presentaron uno o varios usos/percepciones. Ninguna especie de ave es comercializada por los propietarios de las fincas productivas. Los usos de las aves se restringieron al de alimento (14.3%) y el de ornamento o mascotas (6.11%). El 4.1% de aves fueron percibidas con importancia cultural, 6.1% con beneficios para el ganado e igual porcentaje como perjudiciales para el ganado. El 20.4% de aves eran percibidas como plagas de cultivos y el 8.2% como rapaces.

El mantener los remanentes de bosques riparios, dentro de los paisajes productivos, ha significado un gran aporte para la conservación de especies silvestres en SDT, frente a la pérdida de sus hábitats, tanto así, entre aves y mamíferos (Pozo & Eras, en prep.) que se registraron 2 especies "Vulnerables", 4 "Casi amenazadas", 1 "En Peligro", 1 "Al Margen de Riesgo" y 13 especies dentro de los apéndices del CITES. Las perturbaciones, existentes en la comunidad biológica de los bosques riparios, no han sido de gran magnitud, en vista de los registros de 1 ave endémica del Ecuador, 8 especies indicadoras de un buen ecosistema, 12 especies paraguas y 17 especies bandera.

6.- RECOMENDACIONES

Realizar estudios de regeneración y aumento de bosques riparios y áreas boscosas dentro de las fincas productivas, para reevaluar la diversidad y abundancia de especies, y las metapoblaciones fruto de estos incrementos.

Realizar estudios similares entre niveles de intensificación de sistemas productivos, y en otros hábitats de las fincas como: cercas vivas, setos vivos, árboles dispersos en potreros.

Aumentar los estudios interdisciplinarios entre agropecuarios, biólogos y parabiólogos, para mejorar y/o crear un esquema más equilibrado de producción, basado en la sostenibilidad (utilización de la diversidad biológica de un modo y a un ritmo que no ocasione su disminución en el largo plazo).

Los registros de aves podrían aumentar, y ampliarse a las demás clases de vertebrados, si se amplían las campañas de muestreo, los días por campaña, y el personal encargado.

Los valores de diversidad y abundancia de especies silvestres se pueden incrementar, y representar un ejemplo para las demás zonas productivas ecuatorianas, en base de aumentar y mantener los remanentes de bosques nativos dentro de las fincas productivas, con lo que las poblaciones podrían tener un tamaño colectivo suficientemente grande como para persistir indefinidamente. Creando de este modo corredores riparios, los que mantendrán la conectividad biológica entre las fincas productivas, fundamentando su sostenibilidad y sustentabilidad en: 1) el agroturismo, aprovechando la gran cantidad de movimientos "ecoturísticos" de SDT y, 2) el aviturismo, actividad altamente impulsada en las últimas décadas en el Ecuador, en virtud de que las aves son los organismos vivos más populares.

7.- AGRADECIMIENTOS

A los Fondos Semilla del Vicerrectorado de Investigaciones de la ESPE por financiar los proyectos DCV-PIC 019. A Carlos Cárdenas, Lidia Dávila, Laura Mendoza y Catalina Córdova por su ayuda en la toma de datos de campo. A Jaime Villacís por su apoyo en el análisis estadístico. Y sobre todo a los finqueros de Santo Domingo de los Tsáchilas por permitirnos ingresar en sus predios para poder ejecutar nuestro trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Albuja, L.; M. Ibarra; J. Urgilés & R. Barriga. 1980. Estudio Preliminar sobre los Vertebrados Ecuatorianos. Editorial Politécnica, Quito.
2. _____. 1999. Murciélagos del Ecuador. 2ed. Cicetrónica CIA Ltda. Quito Ecuador.
3. ANCON. 2000. Informe Técnico. Línea Base Biótica-Propuesta de Creación del Parque Nacional Santa Fé. Autoridad Nacional del Ambiente, República de Panamá.
4. Arrieta, D. 2000. El Turismo Rural en Costa Rica: Una Visión Agroecoturística. Tecnitur. San José, Costa Rica. (77):2-23.
5. Benítez, V. & Matheus, C. 1997. Diversidad y Abundancia Relativa de Aves en dos localidades en Playa de Oro, Zona de Amortiguamiento de la Reserva Ecológica Cotacachi-Cayapas, Esmeraldas, Ecuador. En: Mena, P., A. Soldi, R. Alarcón, C. Chiriboga & L. Suárez (Eds.). Estudios Biológicos para la Conservación. Diversidad, Ecología y Etnobiología. EcoCiencia. Quito. Pp. 87-107.
6. _____, Canaday, C. & Matheus C. M. 1997. Diversidad y Abundancia Relativa de las Aves en dos localidades en San Miguel, Zona de Amortiguamiento de la Reserva Cotacachi-Cayapas, Esmeraldas, Ecuador. En: Mena, P.A., A. Soldi, R. Alarcón, C. Chiriboga & L. Suárez (Eds.). Estudios Biológicos para la Conservación. Diversidad, Ecología y Etnobiología. EcoCiencia. Quito. Pp. 125-145.
7. BIODIVERSITY PRO. 1997. version 2. The Natural History Museum, London and Scottish Association for Marine Science, Oban, Scotland. United Kingdom.

8. Boutin, C., Benoit, J. & Belanger, L. 2003. Importance of Riparian Habitats to Flora Conservation in Farming Landscapes of Southern Québec, Canadá. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 94: 73-87
9. Burel, F. 1996. Hedgerows and Their Role in Agricultural Landscapes. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 15(2):169-190
10. Cañadas C., L. 1983. El Mapa Bioclimático y Ecológico del Ecuador. MAG-PRONAREG. Banco Central del Ecuador. Quito.
11. Cárdenas T., C. D.; W. E. Pozo R. & L. F. Dávila (en prensa) Beneficios de la flora de los Bosques Riparios en fincas Agrícolas y Ganaderas de Santo Domingo de los Tsáchilas. Para *Cinchonia*.
12. Cárdenas, G., Harvey, C, Ibrahim, M & Finegan, B. 2004. Diversidad y Riqueza de Aves en Diferentes Hábitats en un Paisaje Fragmentado en Cañas, Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*. 10(39):78-85
13. Coopmans, P., J. V. Moore, N. Kabbe, O. John, K. S. Berg, M. Lysinger, L Navarrete and R.S. Ridgely. 2004. The birds of South West Ecuador. CDs. Editing, mix and Digital Mastering by J. V. Moore, San José, CA.
14. Dávila, F. 2009. Etnobotánica de los Bosques Riparios en Fincas Ganaderas y Agrícolas de Santo Domingo de los Tsáchilas. Tesis de Ing. Agrop. ESPE, Quito.
15. Del Moral, T. 2007. Rapaces a la vista. Corporación la Prensa (En línea). Consultado: 2008-02-13. Disponible en: <http://mensual.prensa.com/mensual/contenido/2007/09/22/hoy/vivir/1118789.html>.
16. Deschênes, M., Belanger, L & Giroux J., 2003. Use of Farmland Riparian Strips by Declining and Crop Damaging Birds. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 95: 567-577
17. Eras, a. 2008. Diversidad y Etnobiología de Aves y Mamíferos Presentes en Bosques Riparios de Fincas agrícolas y Ganaderas de Santo Domingo, Ecuador. Tesis de Ing. Agrop. ESPE, Quito.
18. Estrada, A.; Coates-Estrada, R; Meritt Jr, D; Montiel, S; Curiel, D. 1993. Patterns of Frugivore Species Richness and Abundance in Forest Islands and in Agricultural Habitats at Los Tuxtlas, Mexico. *Vegetation*, 107, 245-257
19. Gill, J., Sutherland, W & Watkinson, A. 1996. A Method to Quantify the Effects of Human Disturbance on Animal Populations. *Journal of Applied Ecology* 3:786-792.
20. Gordillo, O., Rincón, M., López, R., Montesinos, R., Waud, J., Waud, D., Hernández, F., & Vázquez, A. 2006. Monitoreo de Aves en Corredores Riparios de las Cuencas Costeras de Chiapas, México. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas Región Frontera Sur De México. Departamento de Estudios y Monitoreo (REBIEN-CONANP)
21. Gregory M. & A. Vaca. 1994. Diversidad y Abundancia Relativa de las Aves Entre la Época Lluviosa y Seca, en la Cordillera de Toisan, Imbabura Ecuador.
22. _____. 1997. Diversidad y abundancia relativa de las aves de Río Negro Chico, (Lita, El Cristal), zona de amortiguamiento de la Reserva Ecológica Cotacachi-Cayapas, Esmeraldas, Ecuador. En: Mena, P.A., A. Soldi, R. Alarcón, C. Chiriboga & L. Suárez (Eds.). *Estudios biológicos para la Conservación. Diversidad, Ecología y Etnobiología. EcoCiencia*. Quito. Pp. 165-180.
23. Guerrero M., Muñoz-Pedreras, A. & Möller P. 2006. Importancia de la comunicación ambiental en la conservación de aves rapaces y el control de hantavirus en comunidades rurales. Centro de Estudios Agrarios y Ambientales (CEA)- Valdivia. (En línea). Consultado: 2008-02-13. Disponible en: <http://www.ceachile.cl/rapaces/investigacion.htm>
24. Hames, R. B. & W. T. Vickers. 1982. Optimal Diet Breadth Theory as Model to Explain Variability in Amazonian Hunting. *American Ethnologist* 9(2):358-348.
25. Hanski, I. & M. Gilpin. 1991. Metapopulation Dynamics: Brief History and Conceptual Domain. *Biological Journal of the Linnean Society* 42:3-16

26. Harvey C.A., C. Villanueva, J. Villacís, M. Chacón, D. Muñoz, M. López, M. Ibrahim, R. Gómez, R. Taylor, J. Martínez, A. Navasa, J., D. Sánchez, A. Medina, S. Vilchez, B. Hernández, F. Ruiz, F. López, I. Lang, F.L. Sinclair & A. Perez. 2005. Contribution of Live Fences to the Ecological Integrity of Agricultural Landscapes *Agriculture, Ecosystems and Environment* 111: 200–230
27. IGM, (Instituto Geográfico Militar, EC) 2007. Proyección Universal Transversa De Mercator (UTM). Mapa del Ecuador. Esc. 1:1'000.000. Color
28. INFOSTAT 2006. InfoStat, versión 1.1. Manual del Usuario. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. Primera Edición, Editorial Brujas Argentina.
29. INIAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, EC). 2004. Datos Meteorológicos de Santo Domingo de los Colorados. (En línea). Consultado el 2004-10-15. Disponible en: <http://www.iniap-ecuador.gov.ec/estaciones/eesantodomingo.html>.
30. Machtans, C, S., Villard, M., & Hannon, S, J. 1996. Use of Riparian Buffer Strips as Movement Corridos by Forest Birds. *Conservation Biology* 10 (5):1366-1379
31. Magurran A. E. 1988. *Ecological Diversity and Its Measurement*. Princeton University Press. 192pp.
32. Maisonneuve, C. & Rioux S. 2001. Importance of Riparian Habitats for Small Mammal and Herpetofaunal Communities in Agricultural Landscapes of Southern Québec. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 83: 165-175
33. Mena, P.A. 1996. Etnozoología del Volcán Sumaco, Napo-Ecuador. *Geográfica* 36: 121-178.
34. _____. 1998. Importancia Económica de los Mamíferos en Tres Etnias del Ecuador. Pp. 199 - 204. En: D. Tirira (ed). *Biología, Sistemática y Conservación de los Mamíferos del Ecuador*. Publicación Especial 1, PUCE, QCAZ.
35. Mena P.A. & A. Ruiz. 1997. Diversidad y Abundancia Relativa de Mamíferos de Río Negro Chico, (lita, El Cristal), zona de amortiguamiento de la Reserva Ecológica Cotacachi-Cayapas, Esmeraldas, Ecuador. En: Mena, P.A., A. Soldi, R. Alarcón, C. Chiriboga & L. Suárez (Eds.). *Estudios biológicos para la Conservación. Diversidad, Ecología y Etnobiología*. EcoCiencia. Quito. Pp. 181-194.
36. _____. & V. Utreras. 1997. Diversidad y Abundancia Relativa de los Mamíferos en San Venancio, Cuellaje zona de amortiguamiento de la Reserva Ecológica Cotacachi-Cayapas, Imbabura, Ecuador. En: Mena, P.A., A. Soldi, R. Alarcón, C. Chiriboga & L. Suárez (Eds.). *Estudios biológicos para la Conservación. Diversidad, Ecología y Etnobiología*. EcoCiencia. Quito. Pp. 231-242
37. _____. 1997a. Diversidad y Abundancia Relativa de Mamíferos en Sinangüé, Reserva Cayambe-Coca, Sucumbíos, Ecuador. En: Mena, P., A. Soldi, R. Alarcón, C. Chiriboga & L. Suárez (Eds.). *Estudios biológicos para la Conservación. Diversidad, Ecología y Etnobiología*. EcoCiencia. Quito. Pp. 57-72.
38. _____. 1997b. Diversidad y Abundancia Relativa de las Aves en Sinangüé, Reserva Cayambe-Coca, Sucumbíos, Ecuador. En: Mena, P.A., A. Soldi, R. Alarcón, C. Chiriboga & L. Suárez (Eds.). *Estudios biológicos para la Conservación. Diversidad, Ecología y Etnobiología*. EcoCiencia. Quito. Pp. 29-56.
39. Ministerio del Ambiente (EC), Ecociencia y UICN (Unión Mundial para la Naturaleza). Informe 2001. Biodiversidad del Ecuador. Editado por Carmen José. Quito, Ecuador.
40. Mittermeier, R.A., P. Robles y C. G. Goettsch, M. 1997. *Megadiversidad: los Países Biológicamente más Ricos del Mundo*. CEMEX-Conservación Internacional, Québec, Canadá.
41. Moreno, C. E. 2001. *Métodos para Medir la Biodiversidad*. M&T–Manuales y Tesis SEA, vol. 1. Zaragoza, 84 pp.
42. Odum, E. P. 1986. *Fundamentos de Ecología*. Nueva Editorial Interamericana. México.
43. Pérez A. M., Sotelo M., Ramírez F., Ramírez I., López A., Siria I. 2006. Conservación de la Biodiversidad en Sistemas Silvopastoriles de Matiguás y Río Blanco (Matagalpa, Nicaragua). *Ecosistemas* 3

44. Pozo R., W.E., Olmedo, I. & Espinosa, S. 2006. Diversidad Rodentológica en Remanentes de Bosque Nativo y Cercas Vivas de la Hacienda El Prado, Seranía Ecuatoriana. Bol. Téc. 6 Ser Zool. 2: 33-44.
45. _____. & Cárdenas, C. 2008. Uso Etnobiológico de la Flora, Aves y Mamíferos de los Bosques Riparios de Fincas Ganaderas de Santo Domingo de los Colorados. INFORME TÉCNICO. Departamento de Investigaciones de la Carrera de Ingeniería de Ciencias Agropecuarias. Escuela Politécnica del Ejército (ESPE).
46. _____, Cárdenas, C. Dávila F. & Eras A. 2008. Diversidad y Uso Etnobiológico de Flor, Aves y Mamíferos de Santo Domingo de los Tsáchilas. Departamento de Investigaciones de la Carrera de Ingeniería de Ciencias Agropecuarias. Escuela Politécnica del Ejército (ESPE).
47. _____. & Eras-Moreira, A. 2007. Nuevo Registro Territorial de *Phaethornis malaris* en Santo Domingo de Los Tschilas, Ecuador. Bol. Tec. 7 Ser. Zool. 3: 57-61.
48. Rossetti, M. & A. Giraudo. 2003 Comunidades de Aves de Bosques Fluviales Habitados y no Habitados por el Hombre en el río Paraná Medio, Argentina. Hornero 18(2):89-96.
49. Roth, R. R. 1976. Spatial Heterogeneity and Bird Species Diversity Ecology. 57(4):773-782
50. Rydley, R.S. & Greenfield, P.J. 2006. Aves del Ecuador. Guía de Campo. Academia de Ciencias Naturales de Filadelfia. Fundación de Conservación Jocotoco. Quito, Ecuador.
51. Sierra, R., C. Cerón, W. Palacios y R. Valencia. 1999. Propuesta preliminar de un sistema de clasificación de vegetación para el Ecuador continental. Proyecto INEFAN/GEF-BIRF y Eco-Ciencia, Quito, Ecuador.
52. Suárez, L. 1998. La Fragmentación de los Bosques y la Conservación de los Mamíferos. Pp: 83-92 En: D. Tirira (ed). Biología, Sistemática y Conservación de los Mamíferos del Ecuador. Publicación Especial 1, PUCE, QCAZ.
53. Tapia R., M. 1998. Manejo de Mamíferos Amazónicos en Cautiverio y Semicautiverio en el Centro Experimental Fátima. Pp: 155-198 En: D. Tirira (ed). Biología, Sistemática y Conservación de los Mamíferos del Ecuador. Publicación Especial 1, PUCE, QCAZ.
54. _____. 2007. Guía de Campo de los Mamíferos del Ecuador. Ediciones Murciélago Blanco. Publicación Especial sobre los Mamíferos del Ecuador 6. 576 pp.
55. UICN (The World conservation Union). 2006. Red List of Threatened Species. (En Línea). Consultado: 2006-06-01. Disponible en: <http://www.iuncnredlist.org>
56. Vickers, W. 1981. Informe Preliminar Acerca de las Culturas Siona, Secoya y Cofán para la Comisión Interinstitucional de INCRAE, IERAC y Dirección de Desarrollo Forestal. Informe Técnico. Florida International University. 33p.
57. _____. 1984. The faunal Components of Lowland South American Hunting Kills. Interciencia, 9(6).
58. Villacís J., Racines D., Molina J., Moreira A., Montalvo L., Pozo W. & Chiriboga C. 2007. Implementación de Sistemas de Producción Silvopastoriles en Fincas Ganaderas de Santo Domingo de los Colorados. Bol. Téc. Divulgativo.. Pp 21.
59. Yost, J. A. & P. Nelly. 1983. Shotguns, Blowguns, and Spears: the Analysis of Technological Efficiency. En: B. H. Raymond y W. T. Vickers (eds.), Adaptive Responses of Native Amazonians. Academic Press. New York.

Anexo A. Lista de aves de los bosques riparios de fincas agrícolas y ganaderas, Santo Domingo, 2009.

Especie	Nombre Vulgar	Fincas		Registro	
		Agri.	Gan.		
APODIFORMES					
Trochilidae					
<i>Amazilia amabilis</i> *	Amazilia Pechiazul		P	D	
<i>Amazilia tzacatl</i> *	Amazilia Colirrufa		P	D	
<i>Androdon aequatorialis</i> *	Colibrí piquidentado			I	
<i>Damophila julie</i> *	Colibrí ventrivoleta		P	D	
<i>Phaetornis malaris</i> *	Ermitaño Piquigrande	P	P	D	
<i>Phaetornis yaruqui</i> *	Ermitaño Bigotiblanco		P	D	
CICONIIFORMES					
Ardeidae					
<i>Bubulcus ibis</i>	Garceta Bueyera		A	D	
<i>Butorides striatus</i>	Garza			I	
Cathartidae					
<i>Sarcoramphus papa</i> *	Gallinazo			I	
COLUMBIFORMES					
Columbidae					
<i>Claravis pretiosa</i> *	Tortolas; Tortolita Azul		A	D	
<i>Columba subvinacea</i> *	Paloma			I	
<i>Columbia livia</i>	Paloma	P		D	
<i>Columbina buckleyi</i>	Tortola; Tortolita Ecuatoriana		P	D	
CUCULIFORMES					
Cuculidae					
<i>Crotophaga sulcirostris</i>	Garrapatero		P	D	
FALCONIFORMES					
Accipitridae					
<i>Accipiter superciliosus</i> *	Aguila			I	
<i>Buteo nitidus</i>	Gavilán Gris	M		D	
<i>Leucopternis occidentalis</i>	Gavilán Dorsigrís	P	P	D	
<i>Leucopternis plumbea</i>	Gavilán			I	
PASSERIFORMES					
Icteridae					
<i>Cacicus cela</i>	Cacique			I	
<i>Molothrus bonariensis</i>	Rachero			I	
Emberizidae					
<i>Arremon aurantirostris</i> *	Saltón Piquinaranja	P		D	
<i>Oryzoborus angolensis</i> *	Negro yermo; Semillero menor	P	A	D	
<i>Sporophila corvina</i>	Espiguero Variable	A	A	D	
Fringillidae					
<i>Carduelis xanthogastra</i>	Jilguero Ventriamarillo	P		D	
Furnariidae					
<i>Synallaxis brachyura</i> *	Carpintero; pizarrosa	Colaespina	A	P	D

Continúa en la siguiente página →

* Especies que dependen estrictamente o facultativamente de bosques, Agri = Fincas Agrícolas, Gan = Fincas Ganaderas, A = Abundante, M = Medianamente Abundante, P= Poco Abundante, D = Directo (Captura, Observación, Rastro), I = Indirecto (Encuestas)

Lista de aves de los bosques riparios de fincas agrícolas y ganaderas, Santo Domingo, 2009.
(Continuación)

Especie	Nombre Vulgar	Fincas		Registro
		Agri.	Gan.	
PASSERIFORMES				
Hirundinidae				
<i>Neochelidon tibialis minima</i> *	Golondrina		M	D
<i>Notiochelidon cyanoleuca</i>	Golondrina Azuliblanca		P	D
<i>Progne chalybea</i>	Martín			I
<i>Riparia riparia</i>	Golondrina ribereña		P	D
Mimidae				
<i>Mimus longicaudatus</i>	Cucube	P		D
Parulidae				
<i>Geothlypis auricularis</i> *	Antifacito lorinegro	M		D
<i>Myioborus miniatus</i> *	Candelita goliplomiza	P		D
Thraupidae				
<i>Euphonia saturnata</i>	Eufonia coroninaranja	M		D
<i>Ramphocelus icteronotus</i> *	Tangara Amarilla o lolilimón		M	D
<i>Tachyphonus rufus</i>	Tangara filiblanca		P	D
<i>Thraupis episcopus</i>	Azulejo; Tangara azulejada	P	A	D
Tyrannidae				
<i>Colonia colonus</i> *	Viuditas			I
<i>Empidonax virescens</i>	Amarillo; Mosquitero Verdoso	M	M	D
<i>Fluvicola nengeta</i>	Dominico; Tirano Enmascarado	A	A	D
<i>Pachyramphus spodiurus</i>	Cabezón Pizarroso		P	D
<i>Tityra inquisitor</i> *	Titira coroninegra	P		D
PICIFORMES				
Picidae				
<i>Celeus loricatus</i> *	Carpintero Canelo	A		D
<i>Piculus rubiginosus</i> *	Carpintero			I
Ramphastidae				
<i>Pteroglossus erythropygius</i> *	Dios te dé. Arasari Piquipálido	A	A	D
<i>Ramphastos brevis</i> *	Tucán			I
PSITTACIFORMES				
Psittacidae				
<i>Forpus coelestis</i>	Periquito del pacífico	M	M	D
<i>Geotrygon montana</i> *	Perdiz			I
<i>Pionopsitta pulchra</i>	Loro o perico			I
<i>Pionus chalcopterus</i>	Loro alibronceado		P	D

* Especies que dependen estrictamente o facultativamente de bosques, Agri = Fincas Agrícolas, Gan = Fincas Ganaderas, A = Abundante, M = Medianamente Abundante, P= Poco Abundante, D = Directo (Captura, Observación, Rastro), I = Indirecto (Encuestas)

CONEXIONES DE HORMIGON ESTRUCTURAL PILA-LOSA DE CUBIERTA BAJO CARGAS LATERALES CICLICAS

P. Caiza.⁽¹⁾, B. Andrawes.⁽²⁾, and J. LaFave.⁽³⁾

⁽¹⁾ Graduate Student, Dept. of Civil Engineering,
University of Illinois at Urbana Champaign

⁽²⁾ Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering
University of Illinois at Urbana Champaign

⁽³⁾ Associate Professor, Dept. of Civil Engineering
University of Illinois at Urbana Champaign

RESUMEN

Este artículo discute el desarrollo de modelos analíticos, usando la técnica de secciones divididas en fibras, para describir el comportamiento estructural no lineal de conexiones de hormigón pila-losa de cubierta sujetas a cargas cíclicas laterales. Los modelos son validados en parte usando resultados experimentales obtenidos de la literatura técnica sobre el tema. En el nivel de sección, las comparaciones están enfocadas principalmente a los comportamientos esfuerzo-deformación y momento-curvatura, mientras que al nivel de elemento estructural la comparación de momento vs. desplazamiento lateral es usada para arrojar luz sobre el comportamiento global de la conexión pila-losa de cubierta. Los resultados indican que los modelos desarrollados son capaces de predecir con precisión los comportamientos experimentales local y global, aún incluyendo la ocurrencia de varios estados de daño. Finalmente, se conduce un estudio para explorar el impacto del uso de chaquetas de polímero reforzado con fibras de carbono (CFRP), en la zona de la rótula plástica de la pila, en el comportamiento cíclico de la conexión. La aplicación de chaquetas CFRP puede retrasar la separación del recubrimiento de hormigón y por tanto mejorar la resistencia y la ductilidad de la conexión.

ABSTRACT

This paper discusses the development of analytical models, using the fiber section technique, to describe the nonlinear structural behavior of concrete pile-wharf connections subjected to cyclic lateral loading. The models are validated in part using experimental results obtained from the literature. At the section level, comparisons are primarily focused on the stress-strain and moment-curvature behaviors, while at the element level comparisons of lateral force and moment vs. displacement are utilized to shed light on the global behavior of a pile-wharf connection. Results indicate that the developed models are able to accurately predict the global and local experimental behavior, even including the occurrence of various damage states. Finally, a study is conducted to explore the impact of using

Carbon

Fiber

Reinforced Polymer (CFRP) jackets at the plastic hinge zone of the pile on the cyclic behavior of the connection. The application of CFRP jackets can delay spalling of the cover concrete and thus enhances the strength and ductility of the connection.

1. INTRODUCCIÓN

La respuesta sísmica de estructuras portuarias tales como muelles apoyados sobre pilas puede asumirse que está fuertemente relacionada a un par de factores: la configuración geométrica de la estructura y las condiciones del suelo de cimentación. Dos zonas críticas son reconocidas en las pilas – una dentro del suelo de soporte y otra en la conexión pila-losa de cubierta. Esta última zona debería merecer una consideración especial porque es usualmente accesible y por lo tanto podría ser relativamente fácil de reforzar. Debido al incremento del tráfico comercial entre el continente americano en general y Asia, hay una considerable demanda para expandir puertos y construir otros nuevos. Por lo tanto, una especial atención es requerida en la planificación y construcción de nuevas instalaciones portuarias, tal como podría ser el Puerto de Manta, en la figura 1 (a)

Entre las conexiones pila-losa de cubierta, un subtipo común comprende una pila de hormigón presforzado con una losa de cubierta fundida in-situ. La pila y la losa de cubierta son conectadas por medio de barras “pasador” (dowel bars), con la pila embebida de 5 a 7.5 cms. dentro de la losa, como se puede ver en la Figura 1(b). El trabajo pionero sobre esta materia fue realizado en la Universidad de Canterbury, Nueva Zelanda (Joel et al. 1988). Su espécimen (40 cms. de sección octogonal con cuatro D20 barras pasador) fue considerado el de peor comportamiento, porque la rotación plástica concentró el daño de forma no deseada en una amplia grieta cerca de la interfase pila-cubierta de pila, pero los investigadores sugirieron que este comportamiento podría mejorar con barras pasador adicionales. Un estudio de 1997 conducido en la Universidad de California San Diego (Silva et al. 1997) ilustró que una conexión pila-cubierta a escala natural (pila tipo Caltrans Class 70 ton. con 6-#6 barras pasador embebidas en la cubierta) puede ser susceptible de una reducción significativa en su capacidad a flexión debido a una gran extensión de la pérdida de recubrimiento de hormigón cuando es sometida a cargas laterales cíclicas junto con carga axial variable. Otra conexión pila-cubierta que usaba barras pasador longitudinales y barras con cabeza en forma de T actuando como enlace en la región nodal fue luego probada bajo carga lateral cíclica (sin carga axial) para el Puerto de Los Angeles (POLA) (Sritharan and Priestley 1998). Ellos concluyeron que este tipo de barras aseguraban la ductilidad de la conexión.

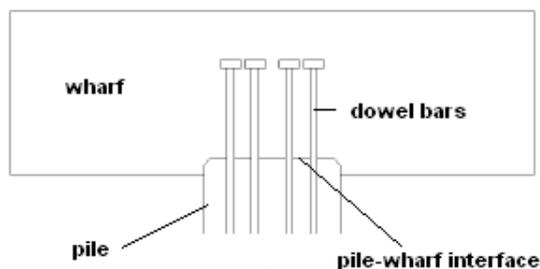


Figura 1. (a) Puerto en Manta y (b) Esquema de la conexión pila-losa de cubierta

Más recientemente, un estudio conducido en la Universidad de Washington (Roeder et al. 2001) involucrando el ensayo de algunas conexiones pila-cubierta, con pilas apenas embebidas dentro de la cubierta, indicó que definitivamente tales conexiones podrían sostener daño significativo bajo cargas laterales reversibles. En un estudio experimental y analítico patrocinado por POLA, dos conexiones pila-cubierta a escala completa (60 cms. de sección octogonal) fueron probadas bajo carga lateral cíclica (Restrepo et al. 2007). Un ensayo representó la conexión “no-sísmica” pila-cubierta (4#9 barras pasador embebidas 45 cms. dentro de la cubierta), mientras que el segundo ensayo representó una conexión “sísmica” (8-#10 barras pasador embebidas 75 cms. dentro de la cubierta). Ambos ensayos mostraron que este tipo de conexiones pueden tener respuestas predecibles y que los desplazamientos laterales correspondientes a los límites de deformación requeridos por el Código para Diseño Sísmico, Modernización y Reparación de Muelles para Contenedores del Puerto de Los Angeles (Puerto de Los Angeles 2004) pueden ser predichos con precisión. Finalmente, cuatro especímenes a escala completa fueron recientemente probados en la Universidad de Washington para evaluar y comparar el rendimiento de diferentes detalles de conexión (Jellin 2008). Estos detalles que incluyeron la separación parcial de las barras pasador del hormigón circundante, la colocación de un cojín semi-rígido entre la pila y la cubierta, y la adición de un abrigo de espuma sintética en el perímetro de la corta longitud embebida de la pila parecieron reducir la extensión del daño en la interfase pila-cubierta (a pesar de alguna pérdida en la rigidez de la conexión).

Todos los especímenes descritos más arriba experimentaron daño en forma de separación de los recubrimientos de hormigón tanto en la pila como en la cubierta y la exposición de los refuerzos longitudinal y lateral a “derivas” entre el 2% y el 5%, aun si la capacidad flexural fue aceptable. Además, a pesar de todos los estudios experimentales descritos previamente, aun hay una considerable falta de herramientas analíticas y modelos que podrían ser usados para investigar y predecir el comportamiento de conexiones pila-cubierta bajo carga sísmica. Este artículo se enfocará por tanto en el desarrollo y calibración de modelos analíticos precisos para conexiones de hormigón armado pila-cubierta que puedan ser usados en futuras investigaciones. Los modelos desarrollados podrán también ser utilizados para explorar el comportamiento de conexiones cuando son reforzadas con chaquetas de polímeros reforzadas con fibras de carbono (CFRP).

2. MODELO ANALÍTICO – DESCRIPCIÓN GENERAL

Los componentes fundamentales del modelo analítico desarrollado son la pila, la cubierta y su interfase. La pila es modelada en una posición sobre la cubierta porque éste es el arreglo experimental típico. Sus diferentes secciones, si bien siempre octogonales, modelan la variable presencia y características del hormigón (incluyendo los efectos de confinamiento), del acero presforzado, y de las barras pasador, como se puede ver esquemáticamente en la Figura 2. La cubierta propiamente dicha es globalmente considerada como un cuerpo rígido, pero su influencia sobre el comportamiento de la pila sí se modela gracias a las características de la interfase pila-cubierta. Debido al hecho de que los elementos de enlace son las barras pasador, su efecto en el comportamiento plástico de la interfase (principalmente debido a la penetración de la cedencia del acero) es tomado en cuenta cuidadosamente. El software usado es

OpenSees (Mazzoni et al. 2009) debido a su conveniente implementación de la técnica de secciones analizadas por medio de fibras y a su biblioteca de materiales que incluye un amplio rango de modelos no lineales de materiales que han sido desarrollados específicamente para aplicaciones sísmicas.

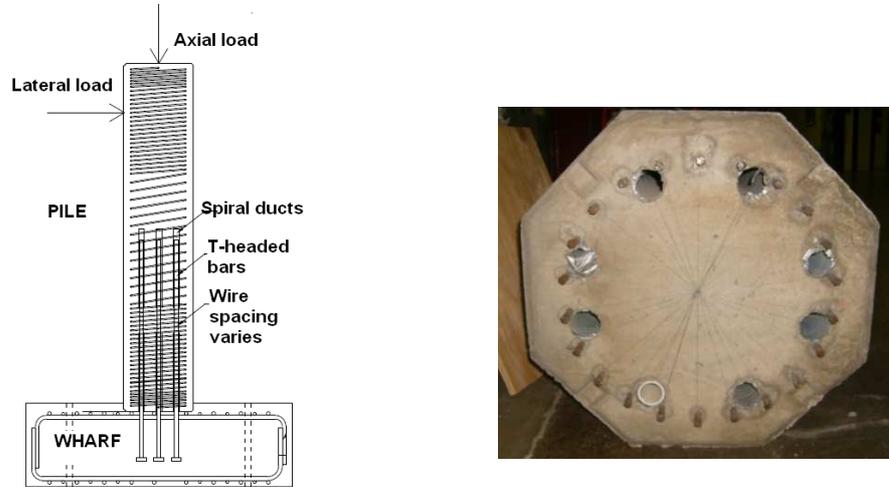


Figura 2. Características generales del modelo y vista de una sección típica de pila

3. MODELO DE PILA

La técnica de modelación de secciones por medio de fibras, que es a la fecha el más eficiente modo de analizar elementos de hormigón presforzado con comportamiento plástico, es usada para modelar las secciones de la pila. Un papel clave dentro de este tipo de análisis es el del modelamiento de los materiales. Cuatro modelos básicos son requeridos: hormigón no confinado para el recubrimiento de la pila, hormigón confinado para el núcleo, acero presforzado para los tendones, y acero común para las barras pasador que conectan la pila a la cubierta.

Modelamiento del Hormigón

El modelo para hormigón Concrete01 de OpenSees fue usado para representar el comportamiento esfuerzo vs. deformación del hormigón; está basado en el modelo uniaxial de Kent-Scott_Park con rigidez de descarga/recarga linealmente degradada de acuerdo al trabajo de Karsan y Jirsa (1969). En este modelo, la resistencia a tensión del hormigón no es considerada. Por otro lado el comportamiento a compresión es definido por los valores de esfuerzo y deformación en los puntos denominados en este artículo “pico” y “último”. La curva hasta la resistencia pico es parabólica y luego lineal. Las curvas para hormigón no confinado y hormigón confinado (en la zona de la rótula plástica) usadas en este estudio pueden ser vistas en Fig. 3, así como una curva para el hormigón reforzado con CFRP (la que será explicada más tarde). En el hormigón no confinado la deformación a la resistencia pico es calculada con las ecuaciones de Thorenfeldt et al. (1987), porque cubren un amplio rango de resistencias del hormigón hasta valores de 18 ksi. La resistencia del hormigón se asume como cero en el punto de deformación última, el cual fue de nuevo calculado usando las ecuaciones de Thorenfeldt et al. (1987).

En la vecindad de la conexión pila-cubierta, el núcleo de la pila está típicamente confinado con una relativamente alta cantidad de refuerzo transversal en forma de espirales. Considerar el efecto de tal confinamiento en el comportamiento constitutivo del hormigón en el núcleo es crucial. Los datos de entrada para el modelo de material Concrete01 fueron por tanto modificados para considerar el efecto del confinamiento. Esfuerzo y deformación en el punto pico se determinaron basándose en el modelo presentado por Mander *et al.* (1988), pero el

esfuerzo residual del hormigón (20% del esfuerzo pico) y deformación (aproximadamente 10 veces la deformación en el esfuerzo pico) fueron considerados tomando en cuenta valores típicos para un modo de falla de deslizamiento friccional último (Mazzoni et al. 2009).

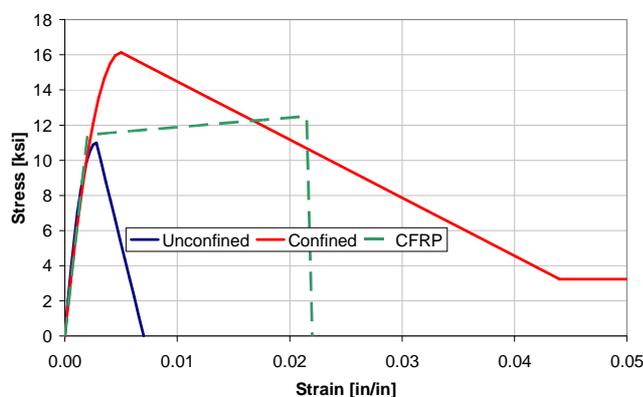


Figura 3. Modelos de hormigón no confinado, confinado y reforzado con CFRP

Modelamiento del Acero

Como se ilustra en la Figura 2, la pila está típicamente reforzada con acero regular (en la forma de barras pasador que cruzan la interfase pila-cubierta) y acero presforzado. El modelo uniaxial de material Steel02 disponible en la librería de materiales del programa OpenSees fue usado para describir el comportamiento de ambos tipos de refuerzo. En este, el comportamiento esfuerzo-deformación del acero de refuerzo es descrito por el modelo no lineal de Menegotto y Pinto (1973). Para elementos tales como pilas, los cuales tienen niveles de compresión axial bajos a moderados, la curva monótonica esfuerzo-deformación provee una respuesta razonable en el rango a tensión pero no en el de compresión (Priestley et al. 1996). Afortunadamente la contribución del acero a compresión no es tan importante como la del hormigón, por lo que el modelo de Menegotto-Pinto es usado en su forma estándar. Se considera, sin embargo, que el acero presforzado tiene un efecto mínimo sobre el comportamiento de la pila cerca de la conexión, principalmente debido a la limitada transferencia de esfuerzos entre el acero presforzado y el hormigón circundante en esa región. Sin embargo vale la pena decir que el acero presforzado juega un importante papel en la reducción del agrietamiento a lo largo de la longitud de la pila.

4. MODELO DE LA INTERFASE PILA-CUBIERTA

El cuidadoso modelamiento de la rotación inelástica en el extremo de la pila es de la más extrema importancia porque está asociada con la extensión del daño estructural y con las estrategias de refuerzo. Ignorar esto puede sobrestimar la contribución de los mecanismos de flexión regulares y por lo tanto sobrestimar el daño estructural (Zhao y Sritharan 2007). La rotación inelástica del extremo de la pila es debida a dos fenómenos: plastificación del hormigón y deslizamiento del refuerzo. Debido a la coexistencia de estos dos fenómenos, la rotación inelástica del extremo de la pila será modelada con un resorte rotacional con dos componentes (acero y hormigón) que los caractericen. Este resorte usará un elemento analizado con fibras pero de longitud unitaria (zero-length section element), que por su generalidad permite la captura del efecto de penetración de deformación sin importar la forma de la sección transversal y la dirección de la carga lateral (Zhao and Sritharan 2007).

Resorte Rotacional

La rotación en una grieta por flexión es igual al deslizamiento de la varilla de acero dividido por la distancia entre esta y la punta de la grieta. Esta altura depende de las características del hormigón plástico (con resistencia reducida) (Oehlers et al. 2009). El modelo

para el hormigón presentado por Oehlers et al. (2009) fue considerado un método conveniente para replicar el comportamiento plástico del hormigón en la interfase. Como se ilustra en la Fig. 4(a), bajo carga lateral excesiva y debido a la presión en la base de la pila, una cuña a compresión se desarrolla. Como se ilustra en la Fig. 4(a), las fuerzas paralela y perpendicular a la cara inclinada (el plano de cortante) pueden ser calculadas por equilibrio y luego relacionadas usando la clásica teoría de Mohr-Coulomb para planos de falla por cortante. La resistencia a compresión longitudinal efectiva de la zona de resistencia reducida del hormigón al comienzo de la falla por cortante friccional es σ_{soft} :

$$\sigma_{soft} = \frac{c + \sigma_{lat} \cos \alpha (\sin \alpha + m \cos \alpha)}{\sin \alpha (\cos \alpha - m \sin \alpha)} \quad (1)$$

Donde: c es el término cohesivo, σ_{lat} es la presión de confinamiento, m es la pendiente del plano de falla en la ecuación de Mohr-Coulomb, y α en el ángulo entre la vertical y el plano inclinado de la cuña de falla

$$\alpha = \tan^{-1} \left(-m + \sqrt{m^2 + 1} \right) \quad (2)$$

La rama inicial de la curva esfuerzo-deformación para el hormigón sigue la forma parabólica usual. Sus valores pico son la resistencia a compresión no confinada f_{co} y la deformación a la resistencia no confinada pico ϵ_{co} . Si hay un nuevo incremento en deformación, aun a pesar de que la resistencia del hormigón no haya alcanzado su máximo confinado, las cuñas por cortante friccional ocurren. Nótese que la profundidad de la zona de resistencia reducida (plástica) del hormigón puede aumentar hasta un límite que depende del deslizamiento total de la cuña.

La metodología descrita mas arriba fue implementada a través del modelo Concrete01 y puede ser vista en la Fig. 4(b).

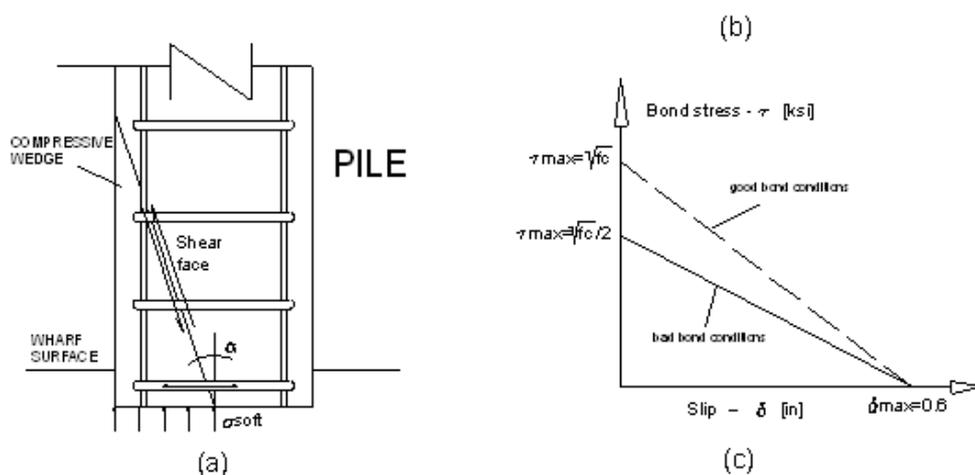


Figura 4. (a) y (b) Hormigón plástico (Oehlers et al. 2009) y (c) esfuerzos de adherencia para barras de refuerzo (Haskett et al. 2009)

El cuidadoso modelamiento del deslizamiento del acero es el factor más importante en la descripción de la penetración de cedencia, como también es explicado por Zhao y Sritharan (2007). El modelo para acero presentado por Haskett et al. (2009) es usado en este artículo por

su base matemática, en contraste con la usual experimental, respecto a la descripción de la penetración de cedencia de las barras de refuerzo, por lo que puede ser fácilmente adaptado para diferentes condiciones de adherencia. Este modelo establece que si las barras de refuerzo permanecen elásticas y no se fracturan antes de fallar por adherencia:

$$P_{rebar} = \frac{\tau_{max} \pi db}{\lambda} \sin \left\{ \arccos \left(\frac{\delta_{max} - \Delta_{rebar}}{\delta_{max}} \right) \right\} \quad (3a)$$

Donde:

$$\lambda^2 = \frac{4\tau_{max}}{\delta_{max} db E} \quad (3b)$$

P_{rebar} es la fuerza en las barras pasador, τ_{max} es la resistencia de adherencia máxima, db es el diámetro de las barras pasador, δ_{max} es el deslizamiento después del cual el esfuerzo de adherencia permanece en cero, Δ_{rebar} es el deslizamiento de las barras pasador, y E es el módulo de elasticidad del acero. La Fig. 4(c) muestra dos curvas para diferentes condiciones de adherencia. Estas ecuaciones son luego modificadas para tomar en cuenta las regiones de comportamiento del acero elástica y de endurecimiento por deformación y se limitan por la resistencia a la fractura de las barras pasador. Este límite es a menudo usado para conexiones pila-cubierta (Zhao y Sritharan 2007). Finalmente estas ecuaciones pueden ser modeladas a través del modelo de material Hysteretic del programa OpenSees por su simplicidad respecto al modelamiento del comportamiento cíclico y sobre todo porque en un elemento "zero-length section", que como se ha indicado supone una longitud unitaria, el "desplazamiento" del elemento (en este caso, deslizamiento de la barra de acero), es igual a la deformación de la sección.

Reforzamiento con CFRP

Parte del objetivo de este trabajo fue explorar la posibilidad de usar chaquetas de CFRP para reducir el daño sufrido por las pilas en la región adyacente a la conexión pila-cubierta cuando son sometidas a cargas cíclicas. Con este fin, el modelo analítico propuesto por Saiidi et al. (2005) fue adoptado y usado para predecir las propiedades del hormigón si es confinado con una chaqueta de CFRP. En este artículo una chaqueta de CFRP (30 cms. de longitud) fue diseñada para un esfuerzo de confinamiento de 300 psi y una deformación de diseño última de 0.004 en la dirección de las fibras de carbono (Caltrans 1996). El módulo de elasticidad del material CFRP fue asumido como 29,200 ksi. El modelo da entre otros resultados un 0.5% de volumen de CFRP con respecto al del hormigón, en otras palabras un total de 14 capas de CFRP.

Validación del Modelo

El modelo analítico presentado en este artículo fue comprobado con los resultados experimentales obtenidos en la Universidad de Washington en su Espécimen 9 (Jellin 2008). La pila de hormigón presforzado tiene una sección octogonal de 60 cms. de diámetro y una longitud de 260 cms. desde la interfase hasta el punto de aplicación de la carga lateral. La losa de cubierta de hormigón fundido en sitio fue simulada con un bloque rectangular macizo de hormigón: 235 cms. de longitud, 132 cms. de ancho y 74 cms. de alto.

Descripción de los materiales usados en el Espécimen 9

El hormigón usado en las pilas tuvo 8000 psi de resistencia de diseño a compresión. Las barras con cabeza en T fueron fijadas dentro de tubos incluidos en la pila y fundidas dentro de la cubierta para crear una conexión resistente a momento. Estas barras fueron ocho #10, ASTM 706 ($F_y = 70$ ksi), de 193 cms. de longitud. La pila también tenía refuerzo en espiral W11, con un espaciado centro a centro variable entre 2.5 y 7.5 cms. El presfuerzo fue alcanzado usando veinte y dos, 1.25 cms en diámetro, 270 ksi, tendones de baja relajación, esforzados a 31 kips/tendón. La pila fue sujeta a una carga axial de 450 kips y a una historia de carga lateral consistente en ciclos entre 0 y 9% de “deriva”.

Graficos Momento-Curvatura

En la sección crítica (cerca del extremo de la pila, en la intersección con la cubierta), las curvas analítica y experimental se muestran en la Fig. 5.

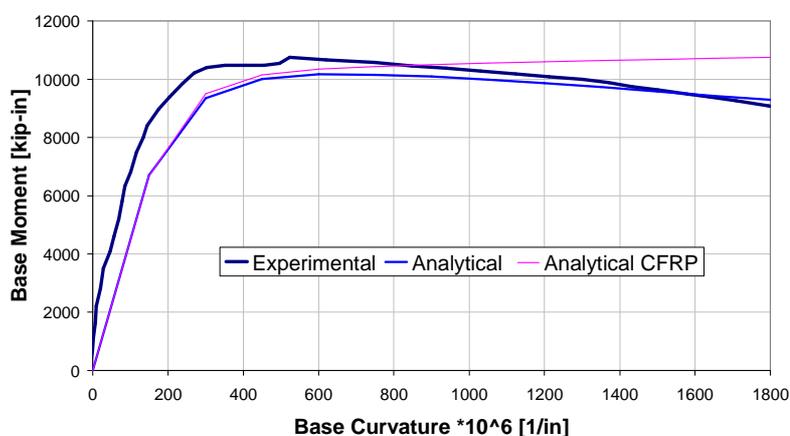


Figure 5. Gráficos Momento-Curvatura

Nótese que los resultados incluyendo el reforzamiento con CFRP también han sido incluidos en la figura y muestran que el confinamiento con CFRP produce una mejora de la resistencia del hormigón. Con el fin de simplificar el análisis, la sección octogonal fue modelada como circular; además la resistencia a tensión del hormigón, como ya se ha indicado, no se consideró. Estas simplificaciones se cree que son las principales razones para las ligeras pero perceptibles diferencias en resistencia y pendiente inicial entre los resultados experimental y analítico. También es importante notar como se ilustra en la Fig. 5, que dado que el recubrimiento de hormigón (7.5 cms.) representa una relativamente gran porción de la sección de la pila, juega un papel importante en la definición de la capacidad a momento de la sección. De aquí que, luego del desprendimiento del recubrimiento, también una relativamente gran reducción en la capacidad a momento fue observada.

Gráficos Desplazamiento Lateral vs. Momento en la Base de la Pila

Las relaciones entre el desplazamiento lateral a nivel del punto de aplicación de la carga lateral y el momento resistente en la unión con la losa de cubierta se muestran en la Fig. 6 para dos modelos analíticos y se pueden comparar con los resultados experimentales. El primer modelo analítico (“Analytical As-Built”) consideró la conexión pila-cubierta como se describe anteriormente, incluyendo el resorte rotacional (pero no el refuerzo de CFRP). El segundo modelo analítico (“Analytical Retrofitted”) muestra los efectos de incluir una chaqueta de CFRP con una longitud de 30 cms. en el extremo de la pila en su unión con la losa de cubierta.

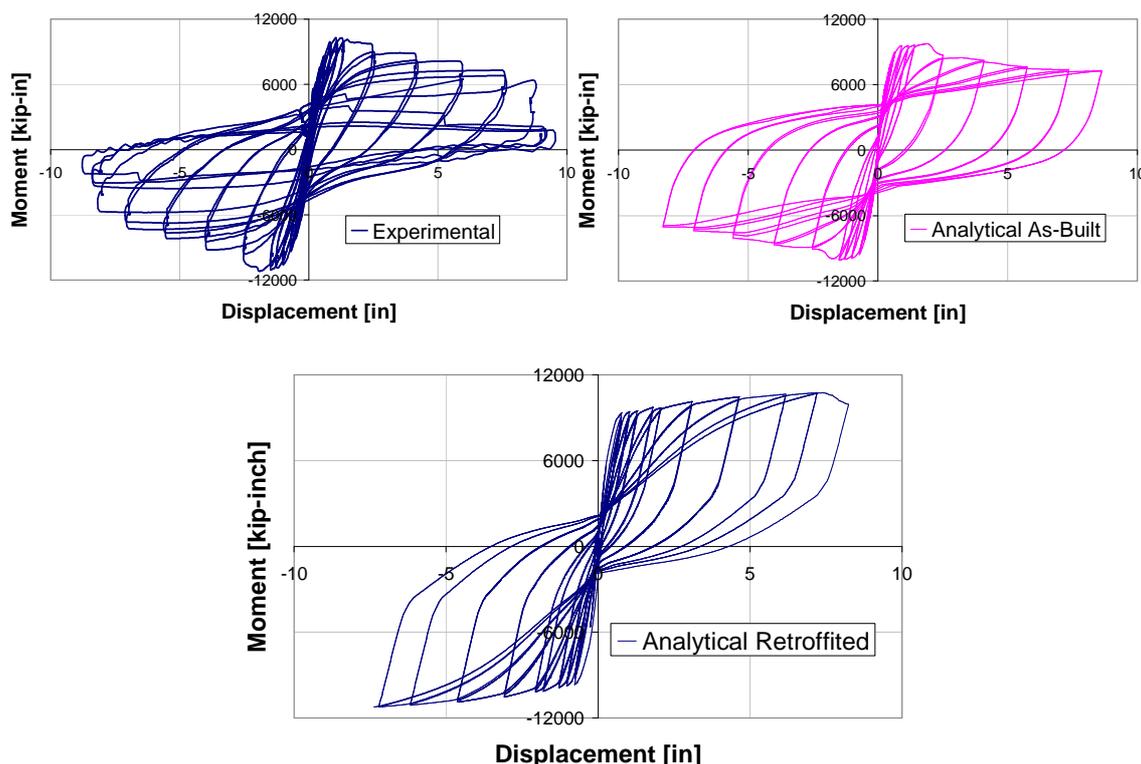


Figura 6. Gráficos Desplazamiento Lateral vs. Momento.

Los resultados del modelo "Analytical As-Built" están en muy buen acuerdo con los resultados experimentales, excepto por la zona de deterioro extremo de resistencia. Por otro lado el confinamiento adicional con CFRP básicamente produce un moderado pero continuo incremento en la capacidad pico a momento en comparación con el modelo sin este refuerzo. Este comportamiento se extiende a casi el rango completo de desplazamientos cíclicos. Debe notarse que la chaqueta de CFRP se asumió que se extendía dentro de la porción embebida de la pila.

5. CONCLUSIONES

Este artículo desarrolla un modelo analítico de fibras para explicar el comportamiento de conexiones pila-losa en las que la pila está embebida dentro de la cubierta de 2.5 a 7.5 cms. Materiales tales como hormigón no confinado y confinado, así como acero regular y presforzado, se presentan, en adición a modelos para hormigón plástico y para el deslizamiento de barras de acero (los cuales fueron necesarios para describir con precisión la rotación en la interfase pila-cubierta). Los resultados analíticos fueron comparados con diferentes resultados experimentales, enfatizando el comportamiento local y global a través de curvas momento vs. curvatura y momento vs. desplazamiento, respectivamente; la coincidencia entre ellos se considera excelente. Y finalmente un modelo básico para refuerzo con CFRP fue introducido para explorar el efecto de mejorar la resistencia del hormigón en la conexión pila-losa de cubierta.

REFERENCIAS

1. California Department of Transportation (Caltrans), 1996. Memo to designers 20-4 attachment B, Engineering Service Center, Earthquake Engineering Branch, Sacramento, Calif., November.

2. Haskett, M., D. J. Oehlers, M. S. Mohamed Ali and C. Wu, 2009. Yield penetration hinge rotation in reinforced concrete beams, *Journal of Structural Engineering*, February 2009.
3. Jellin, A., 2008. Improved seismic connections for pile-wharf construction, M.Sc. Thesis, University of Washington.
4. Joen, P. H., R. Park and M. J. N. Priestley, 1988. Seismic performance of prestressed concrete piles and pile-pile cap connections, Research Report 88-3, University of Canterbury, New Zealand.
5. Karsan, I.D., and J. O. Jirsa, 1969. Behavior of concrete under compressive loading, *Journal of Structural Division ASCE*, 95(ST12).
6. Mander, J. B., M. J. N. Priestley and R. Park, 1988. Theoretical stress-strain model for confined concrete, *Journal of Structural Engineering*, 114 (8), August, 1988.
7. Mazzoni, S., F. McKenna, M. H. Scott, G. L. Fenves, et al, 2009. OpenSees Command Language Manual, July 2007.
8. Menegotto, M., and P. E. Pinto, 1973. Method of analysis for cyclically loaded r.c. plane frames, including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal forces and bending, IASBE Preliminary Report for Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures under Well-Defined repeated Loads, Lisbon, pp15-22.
9. Oehlers, D. J., M. S. Mohamed Ali and M. C. Griffith, 2008. Concrete component of the rotational ductility of reinforced concrete flexural members, *Advances in Structural Engineering*. 11 (3).
10. Priestley, M. J. N., F. Seible and G. M. Calvi, 1996. *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, Wiley, New York, 686 pp.
11. Restrepo, J. I., P. Yin, O. A. Jaradat and M. Weismar, 2007. Performance of new pile-deck connections under earthquakes, *Ports 2007: 30 Years of Sharing Ideas... 1977-2007*.
12. Roeder, C. W., R. Graff, J. Soderstrom and J. H. Yoo, 2001. Seismic performance of pile-wharf connections, PEER Report 2002/07.
13. Saiidi, M. S., K. Sureshkumar and C. Pulido, 2005. Simple carbon-fiber-reinforced-plastic-confined concrete model for moment-curvature analysis, *Journal of Composites for Construction*. 9 (1).
14. Silva, P. F., F. Seible and M. J. N. Priestley, 1997. Response of standard Caltrans pile-to-pile cap connections under simulated seismic loads, Report No. SSRP-97/09. Caltrans, University of California, San Diego.
15. Sritharan, S. and M. J. N. Priestley, 1998. Seismic testing of a full-scale pile-deck connection utilizing headed reinforcement, Report TR98/14, Dept. Structural Engineering, UCSD, August 1998, 29 pp.
16. Thorenfeldt, E., A. Tomaszewics and J. J. Jensen, 1987. Mechanical properties of high strength concrete and application to design, *Proceedings of the Symposium: Utilization of High-Strength Concrete*, Stavanger, Norway, June 1987, Tapir, Trondheim, pp. 149-159.

17. The Port of Los Angeles, 2004. Code for Seismic Design, Upgrade and Repair of Container Wharves, 5/18/2004.
18. Zhao, J., and S. Sritharan, 2007. Modeling of strain penetration effects in fiber-based analysis of reinforced concrete structures, ACI Structural Journal, March-April 2007.

ANEXOS

Programa 1

```

# -----
# Geometria general y creacion de archivos de datos
#

# define GEOMETRY -----
set LCol 120;                # column length
set Weight 450.;           # 550 limit superstructure weight [kips]
set PCol 45.;              # 5% column capacity (deberia ser igual a Weight)
# set Mass [expr $Weight/386.4];    # nodal mass

# nodal coordinates:
node 1 0 0;                 # node#, X, Y
node 2 0 7.5;
node 3 0 37.5;
node 4 0 59.0;
node 5 0 82.5;
node 6 0 103;
node 7 0 112.5;
node 8 0 120;
node 9 0 -3;
node 10 0 -3; # prueba flexion
node 11 0 -3; # prueba flexion+compresion
node 12 0 -3;

# Single point constraints -- Boundary Conditions
fix 12 1 0 0;
fix 9 1 1 1;                # node DX DY RZ
fix 10 1 0 0; # prueba flexion
fix 11 1 0 0; # prueba compresion

# equalDOF $rNodeTag $nNodeTag $dof1 (master, slave, dof)
equalDOF 12 10 2 3; # prueba momento (resiste:steel+concrete)
equalDOF 12 11 2 3; # prueba momento+faxial (resiste:concrete)

# nodal masses:
# mass 8 $Mass 1e-9 0.;    # node#, Mx My Mz, Mass=Weight/g, neglect rotational inertia at nodes

# define geometric transformation: performs a linear geometric transformation of beam stiffness and
# resisting force from the basic system to the global-coordinate system
set ColTransfTag 1;        # associate a tag to column transformation
geomTransf PDelta $ColTransfTag ;

# element connectivity:
set numIntgrPts 2;        # number of
# integration points for force-based element
#element dispBeamColumn 1 9 2 $numIntgrPts $SecTag1 $ColTransfTag;
element nonlinearBeamColumn 1 1 2 $numIntgrPts $SecTag1 $ColTransfTag;
element nonlinearBeamColumn 2 2 3 $numIntgrPts $SecTag2 $ColTransfTag;
element nonlinearBeamColumn 3 3 4 $numIntgrPts $SecTag3 $ColTransfTag;
element nonlinearBeamColumn 4 4 5 $numIntgrPts $SecTag4 $ColTransfTag;
element nonlinearBeamColumn 5 5 6 $numIntgrPts $SecTag5 $ColTransfTag;
element nonlinearBeamColumn 6 6 7 $numIntgrPts $SecTag5 $ColTransfTag;
element nonlinearBeamColumn 7 7 8 $numIntgrPts $SecTag6 $ColTransfTag;
#element zeroLengthSection 8 9 1 $SecTag7 -orient 0 1 0 -1 0 0; #vect eje long globcoord, vect en
# seccion el. globcoord
#element zeroLengthSection 9 9 1 $SecTag8 -orient 0 1 0 -1 0 0;
element zeroLengthSection 8 9 10 $SecTag7 -orient 0 1 0 -1 0 0; # prueba momento
# (resiste:steel+concrete)

```

```

element zeroLengthSection 9 9 11 $SecTag8 -orient 0 1 0 -1 0 0; # prueba momento+faxial
(resiste:concrete)
element nonlinearBeamColumn 10 12 1 $numIntgrPts $SecTag9 $ColTransfTag;

# Define RECORDERS -----
set dataDir Data; # set up name of data directory -- simple
file mkdir $dataDir; # create data directory

recorder Node -file Data/DFree.out -time -node 6 -dof 1 disp; # displacements of free nodes
recorder Node -file Data/RBaseM.out -time -node 9 -dof 3 reaction; # support reaction
recorder Node -file Data/RBaseV.out -time -node 12 -dof 1 reaction; # support reaction
#recorder Element -file Data/RBaseELE.out -time -ele 1 section 1 force; # support reaction
recorder Element -file Data/SteelRS.out -time -ele 8 section fiber 8.04 -1.16 $IDbond9 stressStrain;
recorder Element -file Data/CoverRS.out -time -ele 9 section fiber -$ro 0 $IDzero11 stressStrain;
recorder Element -file Data/CoreRS.out -time -ele 9 section fiber -$rc 0 $IDzero10 stressStrain;
recorder Element -file Data/Steel10B.out -time -ele 10 section 1 fiber 8.04 -1.16 $IDreinf5 stressStrain;
recorder Element -file Data/Cover10B.out -time -ele 10 section 1 fiber -$ro 0 $IDconcCover4 stressStrain;
recorder Element -file Data/Core10B.out -time -ele 10 section 1 fiber -$rc 0 $IDconcCore1 stressStrain;
recorder Element -file Data/Steel10T.out -time -ele 10 section 2 fiber 8.04 -1.16 $IDreinf5 stressStrain;
recorder Element -file Data/Cover10T.out -time -ele 10 section 2 fiber -$ro 0 $IDconcCover4 stressStrain;
recorder Element -file Data/Core10T.out -time -ele 10 section 2 fiber -$rc 0 $IDconcCore1 stressStrain;
recorder Element -file Data/Steel1.out -time -ele 1 section 1 fiber 8.04 -1.16 $IDreinf5 stressStrain;
recorder Element -file Data/Cover1.out -time -ele 1 section 1 fiber -$ro 0 $IDconcCover4 stressStrain;
recorder Element -file Data/Core1.out -time -ele 1 section 1 fiber -$rc 0 $IDconcCore1 stressStrain;

# define GRAVITY -----
pattern Plain 1 Linear {
load 8 0 -$Weight 0

# Gravity-analysis parameters -- load-controlled static analysis
set Tol 1.0e-8; # convergence tolerance for test
constraints Plain; # how it handles boundary conditions
numberer Plain; # renumber dof's to minimize band-width (optimization), if you want to
system SparseGeneral -piv; # how to store and solve the system of equations in the
analysis
#test NormDispIncr $Tol 6 ; # determine if convergence has been achieved at the end of
an iteration step
test EnergyIncr 1.0e-9 10
algorithm Newton; # use Newton's solution algorithm: updates tangent stiffness
at every iteration
set NstepGravity 10; # apply gravity in 10 steps
set DGravity [expr 1./$NstepGravity]; # first load increment;
integrator LoadControl $DGravity; # determine the next time step for an analysis
analysis Static; # define type of analysis static or transient
analyze $NstepGravity; # apply gravity

# ----- maintain constant gravity loads and reset time to zero
loadConst -time 0.0

puts "Model Built"

```

Programa 2

```

# -----
# Build a section
# Silvia Mazzoni & Frank McKenna, 2006
# Modified by Pablo Caiza 11-2008
# -----

# SET UP -----
wipe; # clear memory of all past model definitions
model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3; # Define the model builder, ndm=#dimension, ndf=#dofs
set dataDir Data; # set up name of data directory -- simple
file mkdir $dataDir; # create data directory
source LibUnits.tcl; # define units

# MATERIAL parameters -----
# material ID tag
set IDconcCore1 1;
set IDconcCore2 2;
set IDconcCore3 3;
set IDconcCover4 4;
set IDreinf5 5;
set IDreinf6 6;
set IDreinf7 7;
set IDreinf8 8;
set IDbond9 9;
set IDzero10 10;
set IDzero11 11;
set IDcfrp12 12;
set IDcfrp13 13;

# Concrete for cover reinforced with CFRP
# cfrp12
uniaxialMaterial Hysteretic $IDcfrp12 1.145 0.0002 0.5725 0.0006 0.0 0.001 -11.45 -0.002 -12.51 -
0.0215 0 -0.0248 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

#Concrete for core reinforced with CFRP
# cfrp13
uniaxialMaterial Hysteretic $IDcfrp13 1.613 0.0005 0.8065 0.0015 0.0 0.0025 -16.13 -0.005 -17.0 -
0.0215 -3.23 -0.035 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

# nominal concrete compressive strength
set fc [expr -11*$ksi]; # ksi (+Tension, -Compression)
set Ec [expr 57*$ksi*sqrt(-$fc/$psi)]; # Concrete Elastic Modulus
# concCore1 (pitch 1in) OJO! VALORES MODIFICADOS
set fc11 -16.13; # -12.28 ksi, maximum stress
set eps11 -0.00501; # -0.0115 strain at maximum stress
set fc21 -3.23; # -7.69 -2.46 ultimate stress
set eps21 -0.044; # -0.029 strain at ultimate stress

# concCore2 (pitch 1.5in)
set fc12 -14.55; # -10.99 ksi, maximum stress
set eps12 -0.00437; # -0.00900 strain at maximum stress
set fc22 -2.91; # -6.06 -2.20 ultimate stress
set eps22 -0.0224; # -0.0291strain at ultimate stress

# concCore3 (pitch 3in)
set fc13 -12.80; # -9.53 ksi, maximum stress
set eps13 -0.00364; # -0.0061 strain at maximum stress
set fc23 -2.56; # -4.26 -1.91 ultimate stress
set eps23 -0.0141; # -0.0148 strain at ultimate stress

# concCover4 (unconfined)
set fc14 $fc; # UNCONFINED concrete, maximum stress

```

```

set eps14          -0.0028;                # 0.0031 strain at maximum strength of unconfined
    concrete
set fc24           0.0;                    # [expr 0.1*$fc14] ultimate stress
set eps24         -0.01;                  # 0.01 strain at ultimate stress
set lambda 0.1;   # ratio between unloading slope at $eps24 and initial slope
    $Ec
# tensile-strength properties
set ft14 [expr 0.0075*sqrt(-$fc*1000)]; # tensile strength          +tension
set epst14 -0.01;
set ft24 [expr 0.414*$ft14];
set beta 4;
set epst24 0.02;
set Ets4 70;

# reinf5
set Fy5 [expr 71.0*$ksi]; # STEEL yield stress
set Es5 [expr 29000.*$ksi]; # modulus of steel
set Bs5 0.005; # strain-hardening ratio
set R05 18; # control the transition from elastic to plastic branches
set cR15 0.925; # control the transition from elastic to plastic branches
set cR25 0.15; # control the transition from elastic to plastic branches

# reinf6
set Fy6 [expr 243.5*$ksi];# STEEL yield stress 230 248.8
set Es6 [expr 27890.*$ksi]; # modulus of steel 27000
set Bs6 0.01174; # strain-hardening ratio 0.008 0.00772
set R06 7.344; # 7.39 control the transition from elastic to plastic branches
set cR16 0.925; # 1.0852 control the transition from elastic to plastic branches
set cR26 0.15; # 0.00772 control the transition from elastic to plastic
    branches
set inistress6 21.5; # initial stress [ksi]21.5 10.7 98 202.614

# reinf7
set Fy7 [expr 243.5*$ksi];# STEEL yield stress 100 235
set Es7 [expr 27890.*$ksi]; # modulus of steel
set Bs7 0.01174; # strain-hardening ratio
set R07 7.344; # control the transition from elastic to plastic branches
set cR17 0.925; # control the transition from elastic to plastic branches
set cR27 0.15; # control the transition from elastic to plastic branches
set inistress7 128.7; # initial stress [ksi]128.7 64.4 98 202.614 170

# reinf8
set Fy8 [expr 243.5*$ksi];# STEEL yield stress 100 230
set Es8 [expr 27890.*$ksi]; # modulus of steel
set Bs8 0.01174; # strain-hardening ratio
set R08 7.344; # control the transition from elastic to plastic branches
set cR18 0.925; # control the transition from elastic to plastic branches
set cR28 0.15; # control the transition from elastic to plastic branches
set inistress8 171.6; # initial stress [ksi] 138 98 202.614 170

uniaxialMaterial Concrete01 $IDconcCore1 $fc11 $eps11 $fc21 $eps21 ;
uniaxialMaterial Concrete01 $IDconcCore2 $fc12 $eps12 $fc22 $eps22 ;
uniaxialMaterial Concrete01 $IDconcCore3 $fc13 $eps13 $fc23 $eps23 ;
uniaxialMaterial Concrete01 $IDconcCover4 $fc14 $eps14 $fc24 $eps24 ;
#uniaxialMaterial Concrete02 $IDconcCore1 $fc11 $eps11 $fc21 $eps21 $lambda $ft14 $Ets4;
#uniaxialMaterial Concrete02 $IDconcCover4 $fc14 $eps14 $fc24 $eps24 $lambda $ft14 $Ets4;
#uniaxialMaterial Concrete03 $IDconcCore1 $fc11 $eps11 $fc21 $eps21 $lambda $ft14 $epst14 $ft24
    $beta $epst24 ;
#uniaxialMaterial Concrete03 $IDconcCover4 $fc14 $eps14 $fc24 $eps24 $lambda $ft14 $epst14 $ft24
    $beta $epst24;

uniaxialMaterial Steel02 $IDreinf5 $Fy5 $Es5 $Bs5 $R05 $cR15 $cR25;
#uniaxialMaterial ElasticPP 5 27000 0.00245;
uniaxialMaterial ElasticPP 6 27890 0.0008 -0.0004 -0.0008;

```

```

uniaxialMaterial Steel02 $IDreinf7 $Fy7 $Es7 $Bs7 $R07 $cR17 $cR27 0 1 0 1 $inistress7;
uniaxialMaterial Steel02 $IDreinf8 $Fy8 $Es8 $Bs8 $R08 $cR18 $cR28 0 1 0 1 $inistress8;

# Steel bond slip behavior
# factor=2.5 Esec=145[ksi]
#uniaxialMaterial Hysteretic $IDbond9 71 0.009 98 0.366 100 0.4 -71.0 -0.029 -83 -0.7945 -90.0 -
1.56 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
# factor=1.25 Esec=250[ksi]
#uniaxialMaterial Hysteretic $IDbond9 71 0.017 98 0.522 100 0.57 -71.0 -0.029 -83 -0.7945 -90.0 -
1.56 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
# factor=1.7 Esec=180[ksi]
#uniaxialMaterial Hysteretic $IDbond9 71 0.013 98 0.593 100 0.6 -71.0 -0.029 -83 -0.7945 -90.0 -
1.56 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
# actual values (august 2009)
uniaxialMaterial Hysteretic $IDbond9 71 0.013 98 0.262 100 0.3 -71.0 -0.029 -83 -0.7945 -90.0 -
1.56 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
# actual values (finales de august 2009)
#uniaxialMaterial Hysteretic $IDbond9 71 0.0024 98 0.262 -71.0 -0.0024 -98 -0.262 0.0 0.0 0.0 0.0
0.0

#Concrete for the bond slip zero-length element
#uniaxialMaterial Concrete01 $IDzero10 -12.28 -0.138 -2.46 -.3528; # core: strains*12=displ.
#uniaxialMaterial Concrete01 $IDzero11 -8 -0.037 0.0 -0.12; # cover:strains*12=displ.
#uniaxialMaterial Concrete01 $IDzero10 -11 -0.0196 -7.54 -0.07; # core: concrete crushing using shear.
#uniaxialMaterial Concrete01 $IDzero11 -11 -0.0196 -7.54 -0.07; # cover:concrete crushing using shear.
uniaxialMaterial Concrete01 $IDzero10 -11 -0.0028 -8.15 -0.07; # core: -7.54 concrete crushing using
shear.
uniaxialMaterial Concrete01 $IDzero11 -11 -0.0028 -8.15 -0.07; # cover:-7.54 concrete crushing using
shear.

#section Uniaxial 8 12 Mz;

# section GEOMETRY -----
set DSec 24; # Column Diameter [in]
#data for reinf5
set coverSec5 [expr 4*$in]; # Column cover to reinforcing steel NA.
set numBarsSec5 8; # number of uniformly-distributed longitudinal bars
set barAreaSec5 1.27; # area of longitudinal-reinforcement bars

#data for reinf6
set coverSec6 [expr 3*$in]; # Column cover to prestressed steel NA.
set numBarsSec6 22; # number of uniformly-distributed longitudinal strands
set barAreaSec6 0.153; # area of longitudinal-reinforcement strands

#data for reinf7
set coverSec7 [expr 3*$in]; # Column cover to prestressed steel NA.
set numBarsSec7 22; # number of uniformly-distributed longitudinal strands
set barAreaSec7 0.153; # area of longitudinal-reinforcement strands

#data for reinf8
set coverSec8 [expr 3*$in]; # Column cover to prestressed steel NA.
set numBarsSec8 22; # number of uniformly-distributed longitudinal strands
set barAreaSec8 0.153; # area of longitudinal-reinforcement strands

# Generate a circular reinforced concrete section
# with one layer of steel evenly distributed around the perimeter and a confined core.
# confined core.
# by: Michael H. Scott, 2003
# Note:
# Zero degrees is along section y-axis
#
set ri 0.0; # inner radius of the section, only for hollow sections
set ro [expr $DSec/2]; # overall (outer) radius of the section
set nfCoreR 19; # number of radial divisions in the core (number of "rings")

```

```

set nfCoreT 22;           # number of theta divisions in the core (number of "wedges")
set nfCoverR 6;          # number of radial divisions in the cover
set nfCoverT 22;         # number of theta divisions in the cover

# Define the fiber section 1 (1 pitch + normal reinf)
set SecTag1 1;           # ID
section fiberSec $SecTag1 {
  set rc [expr $ro-$coverSec6];           # radius press. (Core
  radius)
  patch circ $IDconcCore1 $nfCoreT $nfCoreR 0 0 $ri $rc 0 360;           # Define the core
  patch
  patch circ $IDconcCover4 $nfCoverT $nfCoverR 0 0 $rc $ro 0 360;           # Define the cover
  patch
  set theta [expr 360.0/$numBarsSec6];           # angle increment between
  bars
  layer circ $IDreinf6 $numBarsSec6 $barAreaSec6 0 0 $rc $theta 360; # Define the prestress
  layer
  fiber -8.04 1.16 $barAreaSec5 $IDreinf5;           # south +
  fiber -6.14 5.32 $barAreaSec5 $IDreinf5;           # south +
  fiber 0.00 8.13 $barAreaSec5 $IDreinf5;           # south +
  fiber 6.14 5.32 $barAreaSec5 $IDreinf5;           # south +
  fiber 8.04 -1.16 $barAreaSec5 $IDreinf5;           # south +
  fiber 6.14 -5.32 $barAreaSec5 $IDreinf5;           # south +
  fiber -2.29 -7.80 $barAreaSec5 $IDreinf5;           # south +
  fiber -6.14 -5.32 $barAreaSec5 $IDreinf5;           # south +
}

# Define the fiber section 2 (1.5 pitch + normal reinf)
set SecTag2 2;           # ID
section fiberSec $SecTag2 {
  set rc [expr $ro-$coverSec7];           # radius press. (Core
  radius)
  patch circ $IDconcCore2 $nfCoreT $nfCoreR 0 0 $ri $rc 0 360;           # Define the core
  patch
  patch circ $IDconcCover4 $nfCoverT $nfCoverR 0 0 $rc $ro 0 360;           # Define the cover
  patch
  set theta [expr 360.0/$numBarsSec7];           # angle increment between
  bars
  layer circ $IDreinf7 $numBarsSec7 $barAreaSec7 0 0 $rc $theta 360; # Define the prestress
  layer
  fiber -8.04 1.16 $barAreaSec5 $IDreinf5;           # south +
  fiber -6.14 5.32 $barAreaSec5 $IDreinf5;           # south +
  fiber 0.00 8.13 $barAreaSec5 $IDreinf5;           # south +
  fiber 6.14 5.32 $barAreaSec5 $IDreinf5;           # south +
  fiber 8.04 -1.16 $barAreaSec5 $IDreinf5;           # south +
  fiber 6.14 -5.32 $barAreaSec5 $IDreinf5;           # south +
  fiber -2.29 -7.80 $barAreaSec5 $IDreinf5;           # south +
  fiber -6.14 -5.32 $barAreaSec5 $IDreinf5;           # south +
}

# Define the fiber section 3 (3 pitch + normal reinf)
set SecTag3 3;           # ID
section fiberSec $SecTag3 {
  set rc [expr $ro-$coverSec8];           # radius press. (Core
  radius)
  patch circ $IDconcCore3 $nfCoreT $nfCoreR 0 0 $ri $rc 0 360;           # Define the core
  patch
  patch circ $IDconcCover4 $nfCoverT $nfCoverR 0 0 $rc $ro 0 360;           # Define the cover
  patch
  set theta [expr 360.0/$numBarsSec7];           # angle increment between
  bars
  layer circ $IDreinf8 $numBarsSec8 $barAreaSec8 0 0 $rc $theta 360; # Define the prestress
  layer
}

```

```

# Define the fiber section 4 (3 pitch only)
set SecTag4 4; # ID
section fiberSec $SecTag4 {
  set rc [expr $ro-$coverSec8]; # radius press. (Core
  radius)
  patch circ $IDconcCore3 $nfCoreT $nfCoreR 0 0 $ri $rc 0 360; # Define the core
  patch
  patch circ $IDconcCover4 $nfCoverT $nfCoverR 0 0 $rc $ro 0 360; # Define the cover
  patch
  set theta [expr 360.0/$numBarsSec7]; # angle increment between
  bars
  layer circ $IDreinf8 $numBarsSec8 $barAreaSec8 0 0 $rc $theta 360; # Define the prestress
  layer
}

# Define the fiber section 5 (1.5 pitch only)
set SecTag5 5; # ID
section fiberSec $SecTag5 {
  set rc [expr $ro-$coverSec7]; # radius press. (Core
  radius)
  patch circ $IDconcCore2 $nfCoreT $nfCoreR 0 0 $ri $rc 0 360; # Define the core
  patch
  patch circ $IDconcCover4 $nfCoverT $nfCoverR 0 0 $rc $ro 0 360; # Define the cover
  patch
  set theta [expr 360.0/$numBarsSec7]; # angle increment between
  bars
  layer circ $IDreinf7 $numBarsSec7 $barAreaSec7 0 0 $rc $theta 360; # Define the prestress
  layer
}

# Define the fiber section 6 (1 pitch only)
set SecTag6 6; # ID
section fiberSec $SecTag6 {
  set rc [expr $ro-$coverSec6]; # radius press. (Core
  radius)
  patch circ $IDconcCore1 $nfCoreT $nfCoreR 0 0 $ri $rc 0 360; # Define the core
  patch
  patch circ $IDconcCover4 $nfCoverT $nfCoverR 0 0 $rc $ro 0 360; # Define the cover
  patch
  set theta [expr 360.0/$numBarsSec7]; # angle increment between
  bars
  layer circ $IDreinf6 $numBarsSec6 $barAreaSec6 0 0 $rc $theta 360; # Define the prestress
  layer
}

# Define the fiber section 7 (Bond Slip-Flexion)
set SecTag7 7; # ID
section fiberSec $SecTag7 {
#   set rc [expr $ro-$coverSec6]; # radius press. (Core
#   radius)
#   patch circ $IDzero10 $nfCoreT $nfCoreR 0 0 $ri $rc 0 360; # Define the core patch
#   patch circ $IDzero11 $nfCoverT $nfCoverR 0 0 $rc $ro 0 360; # Define the cover patch
  fiber -8.04 1.16 $barAreaSec5 $IDbond9; # south +
  fiber -6.14 5.32 $barAreaSec5 $IDbond9; # south +
  fiber 0.00 8.13 $barAreaSec5 $IDbond9; # south +
  fiber 6.14 5.32 $barAreaSec5 $IDbond9; # south +
  fiber 8.04 -1.16 $barAreaSec5 $IDbond9; # south +
  fiber 6.14 -5.32 $barAreaSec5 $IDbond9; # south +
  fiber -2.29 -7.80 $barAreaSec5 $IDbond9; # south +
  fiber -6.14 -5.32 $barAreaSec5 $IDbond9; # south +
}

# Define the fiber section 8 (Bond Slip-Compression)

```

```

set SecTag8 8; # ID
section fiberSec $SecTag8 {
  set rc [expr $ro-$coverSec6]; # radius press. (Core
  radius)
  patch circ $IDzero10 $nfCoreT $nfCoreR 0 0 $ri $rc 0 360; # Define the core patch
  patch circ $IDzero11 $nfCoverT $nfCoverR 0 0 $rc $ro 0 360; # Define the cover patch
}

# Define the fiber section 9 (Stiffened End)
set SecTag9 9;
set ro9 [expr $ro+1];
set nfCoverR9 8; # ID
section fiberSec $SecTag9 {
  set rc [expr $ro-$coverSec6]; # radius press. (Core
  radius)
  # patch circ $IDconcCore1 $nfCoreT $nfCoreR 0 0 $ri $rc 0 360; # Define the core
  patch
  # patch circ $IDconcCover4 $nfCoverT $nfCoverR9 0 0 $rc $ro9 0 360; # Define the core
  patch
  patch circ $IDcfrp13 $nfCoreT $nfCoreR 0 0 $ri $rc 0 360; # Define the core patch
  patch circ $IDcfrp12 $nfCoverT $nfCoverR9 0 0 $rc $ro9 0 360; # Define the core
  patch
  # set theta [expr 360.0/$numBarsSec6]; # angle increment between
  bars
  # layer circ $IDreinf6 $numBarsSec6 $barAreaSec6 0 0 $rc $theta 360; # Define the prestress
  layer
  # set rc1 [expr $ro-$coverSec5];
  # set theta1 [expr 360.0/$numBarsSec5];
  # layer circ $IDreinf5 $numBarsSec5 $barAreaSec5 0 0 $rc1 $theta1 360; # Define the
  reinforcing layer
  fiber -8.04 1.16 $barAreaSec5 $IDreinf5; # south +
  fiber -6.14 5.32 $barAreaSec5 $IDreinf5; # south +
  fiber 0.00 8.13 $barAreaSec5 $IDreinf5; # south +
  fiber 6.14 5.32 $barAreaSec5 $IDreinf5; # south +
  fiber 8.04 -1.16 $barAreaSec5 $IDreinf5; # south +
  fiber 6.14 -5.32 $barAreaSec5 $IDreinf5; # south +
  fiber -2.29 -7.80 $barAreaSec5 $IDreinf5; # south +
  fiber -6.14 -5.32 $barAreaSec5 $IDreinf5; # south +
}

# Define the fiber section 10 (CFRP: 1 pitch + normal reinf)
set SecTag10 10; # ID
section fiberSec $SecTag10 {
  set rc [expr $ro-$coverSec6]; # radius press. (Core
  radius)
  patch circ $IDcfrp13 $nfCoreT $nfCoreR 0 0 $ri $rc 0 360; # Define the core patch
  patch circ $IDcfrp12 $nfCoverT $nfCoverR 0 0 $rc $ro 0 360; # Define the cover patch
  set theta [expr 360.0/$numBarsSec6]; # angle increment between
  bars
  layer circ $IDreinf6 $numBarsSec6 $barAreaSec6 0 0 $rc $theta 360; # Define the prestress
  layer
  fiber -8.04 1.16 $barAreaSec5 $IDreinf5; # south +
  fiber -6.14 5.32 $barAreaSec5 $IDreinf5; # south +
  fiber 0.00 8.13 $barAreaSec5 $IDreinf5; # south +
  fiber 6.14 5.32 $barAreaSec5 $IDreinf5; # south +
  fiber 8.04 -1.16 $barAreaSec5 $IDreinf5; # south +
  fiber 6.14 -5.32 $barAreaSec5 $IDreinf5; # south +
  fiber -2.29 -7.80 $barAreaSec5 $IDreinf5; # south +
  fiber -6.14 -5.32 $barAreaSec5 $IDreinf5; # south +
}

# Define the fiber section 11 (CFRP: 1.5 pitch + normal reinf)
set SecTag11 11; # ID
section fiberSec $SecTag11 {

```

```

set rc [expr $ro-$coverSec7]; # radius press. (Core
radius)
patch circ $IDcfrp13 $nfCoreT $nfCoreR 0 0 $ri $rc 0 360; # Define the core patch
patch circ $IDcfrp12 $nfCoverT $nfCoverR 0 0 $rc $ro 0 360; # Define the cover patch
set theta [expr 360.0/$numBarsSec7]; # angle increment between
bars
layer circ $IDrein7 $numBarsSec7 $barAreaSec7 0 0 $rc $theta 360; # Define the prestress
layer
fiber -8.04 1.16 $barAreaSec5 $IDrein5; # south +
fiber -6.14 5.32 $barAreaSec5 $IDrein5; # south +
fiber 0.00 8.13 $barAreaSec5 $IDrein5; # south +
fiber 6.14 5.32 $barAreaSec5 $IDrein5; # south +
fiber 8.04 -1.16 $barAreaSec5 $IDrein5; # south +
fiber 6.14 -5.32 $barAreaSec5 $IDrein5; # south +
fiber -2.29 -7.80 $barAreaSec5 $IDrein5; # south +
fiber -6.14 -5.32 $barAreaSec5 $IDrein5; # south +

set Dmax [expr 0.005*103]; # maximum displacement of pushover. push to 5% drift.
set Dincr [expr 0.0005*103]; # displacement increment for pushover. you want this to be very small,
but not too small to slow down the analysis
set Hload [expr $Weight]; # define the lateral load as a proportion of the weight so that the pseudo time
equals the lateral-load coefficient when using linear load pattern
pattern Plain 200 Linear {}; # define load pattern -- generalized
load 6 $Hload 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
}

```

Programa 3

```

set constraintsType Plain;          # default;
constraints $constraintsType

numberer Plain

#system BandGeneral
system SparseGeneral -piv;        # Overkill, but may need the pivoting!

set Tol 1.e-9;                    # Convergence Test: tolerance
set maxNumIter 10;                # Convergence Test: maximum number of iterations that will be performed
                                # before "failure to converge" is returned
set printFlag 0;                  # Convergence Test: flag used to print information on convergence (optional) # 1:
                                # print information on each step;
set TestType EnergyIncr;          # Convergence-test type
test $TestType $Tol $maxNumIter $printFlag;

set algorithmType Newton
algorithm $algorithmType;

#cycle 1
foreach Aux1 {4 4} {
set Nsteps [expr $Aux1/2];        # $Aux1 number of pushover analysis steps
foreach Dincr1 {.00721 -.00721 -.008755 .008755} {
integrator DisplacementControl 6 1 $Dincr1
analysis Static
set ok [analyze $Nsteps];        # this will return zero if no convergence problems were encountered

if {$ok != 0} {
puts "Analysis 1 fails!"
}; # end if ok !0
}
}

#cycle 2
foreach Aux1 {4 4} {
set Nsteps [expr $Aux1/2];        # $Aux1 number of pushover analysis steps
foreach Dincr1 {.009785 -.009785 -.01133 .01133} {
integrator DisplacementControl 6 1 $Dincr1
analysis Static
set ok [analyze $Nsteps];        # this will return zero if no convergence problems were encountered

if {$ok != 0} {
puts "Analysis 2 fails!"
}; # end if ok !0
}
}

#cycle 3
foreach Aux1 {4 4} {
set Nsteps [expr $Aux1/2];        # $Aux1 number of pushover analysis steps
foreach Dincr1 {.012875 -.012875 -.01545 .01545} {
integrator DisplacementControl 6 1 $Dincr1
analysis Static
set ok [analyze $Nsteps];        # this will return zero if no convergence problems were encountered

if {$ok != 0} {
puts "Analysis 3 fails!"
}; # end if ok !0
}
}

#cycle 4
foreach Aux1 {12 12} {
set Nsteps [expr $Aux1/2];        # $Aux1 number of pushover analysis steps
foreach Dincr1 {.011502 -.011502 -.012188 .012188} {

```

```

integrator DisplacementControl 6 1 $Dincr1
analysis Static
set ok [analyze $Nsteps]; # this will return zero if no convergence problems were encountered

if {$ok != 0} {
    puts "Analysis 4 fails!"
}; # end if ok !0
}
}
#cycle 5
foreach Aux1 {60 60 60 60 60 60} {
set Nsteps [expr $Aux1/2]; # $Aux1 number of pushover analysis steps
foreach Dincr1 {.010334 -.010334 -.010918 .010918} {
integrator DisplacementControl 6 1 $Dincr1
analysis Static
set ok [analyze $Nsteps]; # this will return zero if no convergence problems were encountered

if {$ok != 0} {
    puts "Analysis 5 fails!"
}; # end if ok !0
}
}
#cycle 6
foreach Aux1 {100 100 100 100} {
set Nsteps [expr $Aux1/2]; # $Aux1 number of pushover analysis steps
foreach Dincr1 {.009579 -.009579 -.010321 .010321} {
integrator DisplacementControl 6 1 $Dincr1
analysis Static
set ok [analyze $Nsteps]; # this will return zero if no convergence problems were encountered

if {$ok != 0} {
    puts "Analysis 6 fails!"
}; # end if ok !0
}
}
#cycle 7
foreach Aux1 {128 128 128 128} {
set Nsteps [expr $Aux1/2]; # $Aux1 number of pushover analysis steps
foreach Dincr1 {.010332 -.010332 -.011137 .011137} {
integrator DisplacementControl 6 1 $Dincr1
analysis Static
set ok [analyze $Nsteps]; # this will return zero if no convergence problems were encountered

if {$ok != 0} {
    puts "Analysis 7 fails!"
}; # end if ok !0
}
}
#cycle 8
foreach Aux1 {180 180} {
set Nsteps [expr $Aux1/2]; # $Aux1 number of pushover analysis steps
foreach Dincr1 {.010346 -.010346 -.011273 .011273} {
integrator DisplacementControl 6 1 $Dincr1
analysis Static
set ok [analyze $Nsteps]; # this will return zero if no convergence problems were encountered

if {$ok != 0} {
    puts "Analysis 8 fails!"
}; # end if ok !0
}
}
#cycle 9
foreach Aux1 {228 228} {
set Nsteps [expr $Aux1/2]; # $Aux1 number of pushover analysis steps

```

```

foreach Dincr1 {.010372 -.010372 -.011194 .011194} {
integrator DisplacementControl 6 1 $Dincr1
analysis Static
set ok [analyze $Nsteps]; # this will return zero if no convergence problems were encountered

if {$ok != 0} {
puts "Analysis 9 fails!"
}; # end if ok !0
}
}
#cycle 10
foreach Aux1 {272 272} {
set Nsteps [expr $Aux1/2]; # $Aux1 number of pushover analysis steps
foreach Dincr1 {0.010429 -0.010429 -0.010997 0.010997} {
integrator DisplacementControl 6 1 $Dincr1
analysis Static
set ok [analyze $Nsteps]; # this will return zero if no convergence problems were encountered

if {$ok != 0} {
puts "Analysis 10 fails!"
}; # end if ok !0
}
}
#cycle 11
foreach Aux1 {488 488} {
set Nsteps [expr $Aux1/2]; # $Aux1 number of pushover analysis steps
foreach Dincr1 {.010338 -.010338 -.010389 .010389} {
integrator DisplacementControl 6 1 $Dincr1
analysis Static
set ok [analyze $Nsteps]; # this will return zero if no convergence problems were encountered

if {$ok != 0} {
puts "Analysis 11 fails!"
}; # end if ok !0
}
}
#cycle 12
foreach Aux1 {400 400} {
set Nsteps [expr $Aux1/2]; # $Aux1 number of pushover analysis steps
foreach Dincr1 {0.020487 -0.020487 -0.020023 0.020023} {
integrator DisplacementControl 6 1 $Dincr1
analysis Static
set ok [analyze $Nsteps]; # this will return zero if no convergence problems were encountered

if {$ok != 0} {
puts "Analysis 12 fails!"
}; # end if ok !0
}
}
#cycle 13
foreach Aux1 {560 560} {
set Nsteps [expr $Aux1/2]; # $Aux1 number of pushover analysis steps
foreach Dincr1 {.020589 -.020589 -.019978 .019978} {
integrator DisplacementControl 6 1 $Dincr1
analysis Static
set ok [analyze $Nsteps]; # this will return zero if no convergence problems were encountered

if {$ok != 0} {
puts "Analysis 13 fails!"
}; # end if ok !0
}
}
#cycle 14
foreach Aux1 {720 720} {

```

```
set Nsteps [expr $Aux1/2];    # $Aux1 number of pushover analysis steps
foreach Dincr1 {.02046 -.02046 -.019713 .019713} {
integrator DisplacementControl 6 1 $Dincr1
analysis Static
set ok [analyze $Nsteps];    # this will return zero if no convergence problems were encountered

if {$ok != 0} {
    puts "Analysis 14 fails!"
};    # end if ok !0
}
}
#cycle 15
foreach Aux1 {840 840} {
set Nsteps [expr $Aux1/2];    # $Aux1 number of pushover analysis steps
foreach Dincr1 {.020551 -.020551 -.019725 .019725} {
integrator DisplacementControl 6 1 $Dincr1
analysis Static
set ok [analyze $Nsteps];    # this will return zero if no convergence problems were encountered

if {$ok != 0} {
    puts "Analysis 15 fails!"
};    # end if ok !0
}
}
puts "Pushover Done. Control Disp=[nodeDisp 6 1]"
```