

PARTE III

Bioacumulación y biomagnificación del mercurio

en los peces de la cuenca Iténez

Tamara Pérez Rivera & Marc Pouilly

III.1- Introducción

Los peces son buenos bioindicadores de contaminación acuática, debido a que se encuentran en contacto permanente con el agua, están presentes en todos los niveles tróficos de consumidores gracias a sus diversas adaptaciones alimenticias y sirven como base alimenticia para muchas poblaciones humanas. Por ello han sido ampliamente usados para determinar el estado de contaminación por mercurio de los cuerpos de agua de todo el mundo y en particular de la Amazonía (Maurice-Bourgoin *et al.* 2000, Hylander *et al.* 2000, Barbosa *et al.* 2003, Da Silva *et al.* 2005, entre otros).

En un medio acuático contaminado por mercurio los peces experimentan un proceso de bioacumulación que corresponde al incremento de la concentración de mercurio en sus tejidos a lo largo de su vida (Deza 1997), por lo que se genera una relación entre la edad, inferida a través del tamaño o peso, con las tasas de mercurio de los individuos. Esta relación se ajusta a diversos patrones. En peces amazónicos se han propuesto cuatro patrones principales de bioacumulación (Figura III.1, Roulet 2001): lineal positivo (a), escalonado positivo (b), neutro (c) y escalonado negativo (d), aunque existen otros estudios en los que se reportan patrones como el lineal negativo (Maurice-Bourgoin & Quiroga 2000, Da Silva *et al.* 2005) y curvilíneo negativo o positivo (López 2005). Los patrones de bioacumulación negativos contradicen al concepto de bioacumulación, sin embargo se cree que este tipo de patrón podría estar determinado por cambios en la dieta de los peces relacionados con su estado de maduración, a los cambios en la disponibilidad de alimento determinados por los ciclos de inundación (Dorea *et al.* 2006), a los cambios de lugar de vida por migración.

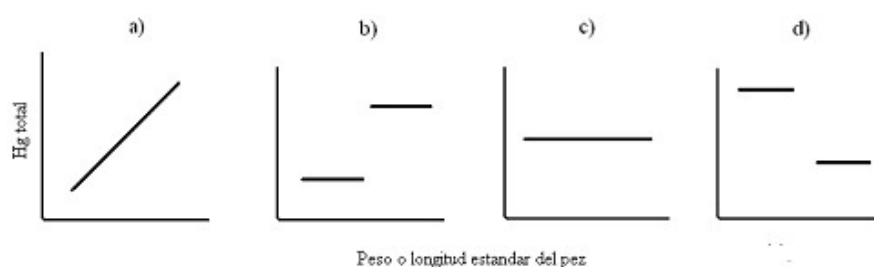


Figura III 1- Modelos de bioacumulación del mercurio total en peces de la Amazonía (Roulet, 2001).

El hábito alimenticio y correlativamente el nivel trófico de las especies son, además de las concentraciones presentes en el medio, unos de los principales factores determinantes en las concentraciones de mercurio del individuo. El proceso de biomagnificación del mercurio predice un incremento en la concentración en los tejidos de especies de un mismo nivel trófico al siguiente superior (Lacerda *et al.* 1994, Barbosa *et al.* 2003). Los peces con hábitos alimenticios carnívoros presentan mayores concentraciones de mercurio en relación a los peces con hábitos no carnívoros (Boschio *et al.* 1995, Lebel *et al.* 1997). Recientemente se ha incorporado la evaluación de las tasas del nitrógeno isotópico estable ($\delta^{15}\text{N}$) para determinar de forma semicuantitativa los niveles tróficos (Cabana & Rasmussen 2002) y se ha visto que en algunos casos este elemento correlaciona con las concentraciones de mercurio en peces (Bowles *et al.* 2001, Da Silva *et al.* 2003), lo que delata la influencia de la posición trófica sobre las concentraciones de mercurio.

Este trabajo buscó revelar el estado de contaminación por mercurio de la cuenca del Iténez a través de la estimación de las concentraciones en mercurio de seis especies de peces de diferentes niveles tróficos, y del estudio comparativo de los procesos de bioacumulación y biomagnificación entre una zona de referencia natural (sector de Bella Vista) y el río Iténez.

III.2- Métodos

Para determinar las concentraciones de mercurio de los peces de la cuenca del río Iténez se realizaron dos campañas de muestreo, al principio de la época seca (junio 2007) y a final de la misma (septiembre, 2007) tanto en el río Iténez como en la zona de referencia (Figura 2, Pagina 5). En total, se muestrearon peces en 19 lagunas o bahías cercanas a los ríos, 15 de los cuales se encontraron a lo largo de 550 km del río Iténez y fueron agrupados en Alto Iténez, Remanso, Mategua, Versalles y Bajo Iténez (Figura 2, Pagina 5). Los restantes cuatro puntos de muestreo se encuentran en la zona de referencia natural y corresponden a lagunas cercanas a los dos ríos Blanco y San Martín, cuyas calidades de aguas difieren entre sí principalmente por la carga sedimentaria (parte II).

El arte de pesca implementado fue el de redes agalleras en todos los puntos de muestreo; en las poblaciones de Remanso y Bella Vista, además se muestrearon peces capturados por los pescadores. Una vez colectados los peces, se midió la longitud estándar y peso de cada individuo y se tomó una muestra de músculo dorsal que se almacenó de forma individual en frascos de polímero de etileno-propileno (PEP) y se conservó a menos de 4 °C para evitar su degradación.

En total se obtuvo 1597 muestras de músculo dorsal de peces pertenecientes a 33 especies representantes de 6 niveles tróficos: piscívoros generalistas, piscívoros estrictos, invertívoros, herbívoros, zooplancívoros y detritívoros-alguívoros. Se determinó la concentración de mercurio total y la tasa de nitrógeno isotópico estable ($\delta^{15}\text{N}$) sobre un total de 598 individuos pertenecientes a 21 especies y repartidas en los diferentes sitios del estudio. Un estudio más preciso de patrones de bioacumulación y biomagnificación se realizó sobre 6 especies, cuya selección fue basada en su abundancia, distribución, dieta e importancia económica o alimenticia de las mismas (Tabla III.1): *Pygocentrus nattereri* (Piraña roja), *Hoplias malabaricus* (Bentón), *Acestrorhynchus altus* (Pez cachorro), *Triportheus angulatus* (Sardina), *Schizodon fasciatus* (Piao del campo) y *Curimatella cf. alburna* (Ilorona). Los patrones de bioacumulación de estas seis especies así como su patrón de biomagnificación se determinaron y se compararon para los sectores del río Iténez y los dos ríos de la zona de referencia (Blanco y San Martín).

Las dos especies *P. nattereri* y *H. malabaricus* cumplen un rol importante en la alimentación de las poblaciones locales. Otras especies fueron incluidas para establecer un diagnóstico de contaminación de las especies más importantes para la pesca comercial y la pesca de subsistencia: *Phractocephalus hemiliopterus* (General), *Pseudoplatystoma tigrinum* (Chunquina), *Colossoma macropomum* (Pacú), *Plagioscion squamosissimus* (Corvina), *Cichla monoculus* (Tucunaré) y *Pseudoplatystoma fasciatum* (Súrubi). Estas especies fueron utilizadas como indicadores de contaminación para el consumo humano.

El análisis de mercurio en muestras de músculo dorsal previamente liofilizadas fue realizado en el Laboratorio de Calidad Ambiental (IE-UMSA, La Paz), mediante el método de digestión ácida y lectura en espectrofotómetro de absorción atómica. Cada 16 muestras de peces se midió dos blancos (sin muestra de músculo) y material de referencia certificado TORT (hepatopancreas lobster, valor certificado: $0.27 \pm 0.06 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, valor medido: $0.28 \pm 0.04 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) y DOLT-2 (dogfish músculo e hígado, valor certificado: $2.14 \pm 0.28 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, valor medido: $2.02 \pm 0.17 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$). Para determinar la concentración de mercurio en peso fresco (pf) se empleó una corrección por contenido de humedad perdido durante la liofilización.

Las tasas del nitrógeno isotópico estable ($\delta^{15}\text{N}$) fueron cuantificadas sobre las muestras de músculo dorsal liofilizado en el laboratorio de la Universidad de Davis (California, USA), mediante el análisis elemental de PDZ Europa ANCA-GSL con la interface de las tasas de isótopos de espectrofotómetro de masa (pagina web: <http://stableisotopefacility.ucdavis.edu/>). Las tasas de $\delta^{15}\text{N}$ permiten

cuantificar la posición trófica de cada individuo, así como el largo de la cadena alimenticia en cada sector. Este último parámetro está estimado por la diferencia entre las tasas de $\delta^{15}\text{N}$ de las dos especies con mayor y menor tasa de $\delta^{15}\text{N}$ (Vander Zanden *et al.* 1997).

Para determinar los patrones de bioacumulación del mercurio, las concentraciones de mercurio obtenidas para los peces fueron relacionada con el tamaño (Largo Estándar, LS) de los individuos por especie, río y sector (Iténez, Blanco y San Martín). Así mismo se relacionó las concentraciones de mercurio con las tasas de $\delta^{15}\text{N}$ transformadas por logaritmo neperiano para obtener relaciones lineares. En caso de una relación linear positiva y significativa entre la tasa de mercurio y el LS o la tasa de $\delta^{15}\text{N}$, y para obtener concentraciones de mercurio comparables e independientes del nivel trófico y del tamaño de los individuos, se realizó la corrección de éstas a partir de una ecuación de la línea, establecida por un análisis de regresión múltiple:

$$\text{Hg}_c = \alpha \text{LS} + \gamma \delta^{15}\text{N} + b.$$

Donde Hg_c es la concentración de mercurio corregida para la longitud estándar y el $\delta^{15}\text{N}$ de cada individuo de cada población. α es la constante asociada a la longitud estándar, γ es la constante asociada al $\delta^{15}\text{N}$ y b es el factor de origen.

La determinación de las diferencias entre las tasas de mercurio en peces de los cuatro sectores del río Iténez y los ríos de la zona de referencia se realizó sobre las tasas de mercurio corregidas para todas las especies que presentaron relaciones lineares, así como las tasas de mercurio cuantificadas en laboratorio para aquellas especies que presentaron relaciones neutras. La determinación de las diferencias entre sectores y ríos se basó en:

- 1) los patrones de bioacumulación ($[\text{Hg}]$ vs. LS) y la relación de las concentraciones de mercurio y ^{15}N de las seis especies más abundantes y con mayor distribución;
- 2) el factor de biomagnificación, el largo de cadena y el factor de contaminación;
- 3) el análisis de las concentraciones de mercurio en especies de consumo.

III.3- Resultados

Las concentraciones de mercurio medidas en peces de la cuenca Iténez varían desde $0.005 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ en un individuo de piao del campo (*S. Fasciatus*, herbívoro) de la zona de referencia, hasta $0.515 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ en un individuo de corvina (*P. squamosissimus*, piscívoro) de la zona de Remanso (río Iténez cerca de la mina de la serranía de San Simón), siendo este el único individuo que sobrepasa el límite de toxicidad probado de $0.5 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (OMS 1991). Sin embargo, el 3% de los peces de diferentes sectores

del río Iténez, sobrepasan el nivel de toxicidad potencial de $0.3 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (EPA 2001). Otras especies que presentan altas concentraciones de mercurio son los surubís (*P. fasciatus*) capturados por los pescadores de la zona de Remanso, los bentones (*H. malabaricus*) también del sector de Remanso y las pirañas rojas (*P. nattereri*) del sector de Versalles (Tabla III.1). Es decir que las concentraciones de mercurio en varias de las especies comerciales o al menos altamente consumidas por los comunitarios del río Iténez presentan niveles de mercurio elevados y mayores a los niveles de las mismas especies extraídas del sector de referencia en Bella Vista. Estas concentraciones son influenciadas por el tamaño (efecto de bioacumulación positiva) y los niveles de ^{15}N de los individuos.

Tabla III 1- Número de individuos, rango de mercurio y de tamaño de las 21 especies de peces capturados en la cuenca del Iténez.

Dieta/Especie	Nombre común	Río	Sector	Hg		LS		15N		
				n	media	Min-Max	media	Min-Max	n	media
Detrívoros										
<i>Curimatella cf. alburna</i>	Llorona	Blanco	Bella Vista	6	0.051	0.025 - 0.113	140.7	116.0 - 157.0	7	7.63
			Versalles	18	0.046	0.008 - 0.094	150.9	135.0 - 163.0	8	7.77
			Bella Vista	12	0.037	0.011 - 0.071	154.9	141.3 - 170.0	8	6.58
<i>Hemiodus unimaculatus</i>	Llorona	Iténez	Bajo Iténez	1	0.122		156.0			
			Versalles	2	0.032	0.022-0.043	143.0	141.0 - 145.0	2	6.87
			Remanso	7	0.033	0.018 - 0.046	157.3	144.0 - 178.0		
<i>Potamorhina latior</i>	Llorona	San Martín	Bella Vista	3	0.034	0.010 - 0.062	151.0	142.0 - 165.0	4	8.60
<i>Psectrogaster essequibensis</i>	Llorona	Iténez	Bajo Iténez	1	0.052		111.0		1	8.40
			Versalles	11	0.063	0.045 - 0.091	145.9	125.0 - 168	12	8.54
			Alto Iténez	6	0.063	0.036 - 0.099	141.3	121.5 - 153.0	6	8.36
			Remanso	21	0.046	0.015 - 0.078	125.8	110.0 - 160.0	10	7.75
<i>Psectrogaster rutiloides</i>	Llorona	San Martín	Bella Vista	1	0.017		123.0		3	8.57
Herbívoros										
<i>Colossoma macropomum</i>	Pacú	Blanco	Bella Vista	4	0.055	0.035 - 0.085	239.6	212.0 - 286.0	3	7.41
			Bajo Iténez	1	0.069		785.0		1	7.16
<i>Schizodon fasciatus</i>	Piao del campo	Blanco	Bella Vista	16	0.039	0.011 - 0.085	234.3	100.0 - 290.0	20	7.87
			Versalles	22	0.053	0.016 - 0.101	231.3	193.0 - 298.0	10	8.11
			Mategua	2	0.070	0.052 - 0.088	174.0	160.0 - 188.0	2	7.04
		San Martín	Alto Iténez	6	0.047	0.013 - 0.073	173.1	124.0 - 194.0	3	6.94
			Remanso	10	0.037	0.019 - 0.052	161.7	95.5 - 250.0	5	7.18
			Bella Vista	18	0.044	0.005 - 0.085	236.9	203.0 - 270	22	7.03
Invertívoros										
<i>Bryconops sp.</i>		Blanco	Bella Vista	1	0.050		112.0			
<i>Triportheus angulatus</i>	Sardina	Blanco	Bella Vista	21	0.072	0.023 - 0.153	134.7	105.0 - 170.0	19	8.88
			Bajo Iténez	6	0.114	0.081 - 0.41	128.3	106.0 - 159.0	4	7.89
			Versalles	15	0.080	0.049 - 0.127	149.7	125.0 - 171.0	8	8.61
		San Martín	Mategua	1	0.054		97.5		1	8.35
			Alto Iténez	2	0.103	0.101 - 0.104	132.3	129.6 - 135.0		
			Remanso	8	0.059	0.016 - 0.121	129.1	110.0 - 139.5	4	8.03
			Bella Vista	14	0.065	0.024 - 0.147	156.5	114.1 - 182.0	16	7.52
Zooplancívoros										
<i>Hypophthalmus edentatus</i>	Blanquillo	Blanco	Bella Vista	2	0.139	0.099 - 0.178	223.5	212.0 - 235.0	2	9.30
			Bajo Iténez	3	0.420	0.325 - 0.483	254.3	244.0 - 265	5	8.30
<i>Hypophthalmus marginatus</i>	Blanquillo	San Martín	Bella Vista	4	0.041	0.008 - 0.077	270.5	245.0 - 295.0	5	7.99

Tabla III. 1 (continuación)

Dieta/Especie	Nombre común	Río	Sector	Hg			LS		15N	
				n	media	Min-Max	media	Min-Max	n	media
Piscívoros estrictos										
<i>Acestrorhynchus altus</i>	Pez cachorro	Blanco	Bella Vista	14	0.080	0.041 - 0.127	171.4	118.0 - 224.0	15	8.42
			Iténez	Versalles	19	0.139	0.091 - 0.187	203.7	161.0 - 244.0	13
		San Martín	Mategua	3	0.129	0.090 - 0.160	211.3	210 - 214		
			Alto Iténez	4	0.148	0.066 - 0.260	173.3	156.0 - 194.0		
			Remanso	11	0.103	0.044 - 0.164	177.7	147.0 - 284.0	6	8.70
<i>Acestrorhynchus microlepis</i>	Pez cachorro	San Martín	Bella Vista	16	0.102	0.026 - 0.203	208.5	162.0 - 251.6	16	8.60
			Bella Vista	4	0.094	0.013 - 0.270	218.3	200 - 258	7	8.50
<i>Ageneiosus brevifilis</i>	Boca de vieja	Iténez	Versalles	1	0.161		253.0		1	9.32
<i>Cichla pleiozona</i>	Tucunaré	Iténez	Versalles	6	0.151	0.122 - 0.176	316.3	269.0 - 443.0		
			Mategua	5	0.117	0.077 - 0.159	196.9	185.3 - 222.9	5	8.08
			Remanso	9	0.122	0.065 - 0.194	306.0	199.0 - 425.0	3	8.95
		San Martín	Bella Vista	11	0.081	0.022 - 0.143	314.8	267.0 - 425	5	8.64
		<i>Hoplias malabaricus</i>	Benton	Blanco	Bella Vista	20	0.078	0.006 - 0.152	283.3	180.0 - 410.0
Iténez	Versalles				14	0.216	0.076 - 0.381	257.4	118.0 - 327.0	13
San Martín	Mategua			6	0.239	0.03 - 0.283	266.1	212.3 - 364.4	6	8.66
	Remanso			28	0.243	0.061 - 0.339	250.7	145.5 - 365.0	25	9.04
	Bella Vista			19	0.073	0.015 - 0.203	297.6	215.0 - 375.0	18	8.76
<i>Phractocephalus hemiliopterus</i>	General	Iténez	Mategua	1	0.252		365.0			
<i>Plagioscion squamosissimus</i>	Curvina	Blanco	Bella Vista	10	0.138	0.043 - 0.371	261.5	213.0 - 350.0	15	9.78
			Iténez	Versalles	1	0.117		335.0		3
		Remanso	1	0.515		490.0		1	11.29	
Piscívoros generalistas										
<i>Pseudoplatystoma fasciatum</i>	Surubí	Blanco	Bella Vista	1	0.191		452.0		6	8.74
			Iténez	Versalles	1	0.195		545.0		1
		San Martín	Mategua	1	0.194		445.0			
			Alto Iténez	6	0.191	0.154 - 0.249	408.3	350.0 - 535.0		
			Remanso	20	0.177	0.055 - 0.303	634.4	340.0 - 820.0	16	10.29
<i>Pseudoplatystoma tigrinum</i>	Pintado	Iténez	Bella Vista	1	0.104		370.0		1	8.68
<i>Pygocentrus nattereri</i>	Piraña roja	Blanco	Remanso	5	0.110	0.060 - 0.210	669.0	475.0 - 800.0		
			Bella Vista	18	0.139	0.050 - 0.260	182.3	128.0 - 234.0	18	10.47
		Iténez	Bajo Iténez	1	0.181		108.0		1	7.10
			Versalles	25	0.193	0.019 - 0.352	219.8	141.0 - 270.0	28	9.96
			Mategua	9	0.193	0.100 - 0.305	169.4	114.0 - 210.4	8	9.46
		San Martín	Alto Iténez	7	0.213	0.164 - 0.292	134.0	98 - 163	5	8.96
			Remanso	22	0.194	0.117 - 0.292	130.8	73.0 - 235.0	20	8.89
		Bella Vista	25	0.081	0.015 - 0.186	205.4	161.0 - 250.0	13	9.26	

n = número de individuos, Hg = mercurio en peso fresco, LS: Longitud estándar y ^{15}N : Tasa de nitrógeno isotópico 15

III.3.1- Patrones de bioacumulación del mercurio en 6 especies

Los patrones de bioacumulación son un indicador de la influencia del tamaño sobre la acumulación del mercurio en los tejidos de los organismos. En este estudio se analizaron en seis especies de diferentes niveles tróficos: detritívoro, herbívoro, insectívoro y piscívoro. Las especies presentaron dos tipos de relación entre [Hg] y LS : linear positiva (la tasa de mercurio aumenta correlativamente con el tamaño de los individuos) y neutra (ausencia de relación entre el tamaño y la tasa de mercurio de los individuos) (Figura III.2).

El patrón neutro se presentó en todas las poblaciones las especies llorona (*Curimatella cf. alburna*) y Piao del campo (*Schizodon fasciatus*). Estas dos especies fueron clasificadas por Pouilly *et al.* (2004)

como detritívoro-alguívoro (la primera) y herbívoro (la segunda). En general, los peces amazónicos con este tipo de dietas no suelen presentar patrones lineares (Barbosa *et al.* 2003, Da Silva *et al.* 2005).

Al menos una de las poblaciones de piraña roja (*Pygocentrus nattereri*), bentón (*Hoplias malabaricus*), pez cachorro (*Acestrorhynchus altus*) y sardina (*Triportheus angulatus*) presentaron un patrón linear positivo, las dos primeras son utilizadas como alimento por los pobladores ribereños. Este tipo de patrón es altamente preocupante cuando se detecta en especies comerciales o de consumo debido a que los individuos de mayor tamaño son seleccionados como alimento. Pouilly *et al.* (2004) determinaron que en el río Mamoré la piraña roja se alimenta de peces y algo de vegetación (piscívoro generalista), el pez cachorro y el bentón se alimentan exclusivamente de peces (piscívoros estrictos) y la sardina consume macroinvertebrados (invertívoro). En la cuenca Amazónica, las especies con hábitos alimenticios carnívoros generalmente presentan patrones lineares positivos (Uryu *et al.* 2001, Barbosa *et al.* 2003, Da Silva *et al.* 2005).

La incidencia de los dos patrones de bioacumulación (positivo y neutro) fueron variables en relación al río. En el río Iténez se presentaron tres especies con patrón linear positivo y tres con patrón neutro; en el río Blanco cuatro especies presentan patrón linear positivo y dos especies un patrón neutro, mientras que en el río San Martín todas las especies se ajustaron al patrón neutro. La presencia de patrones linear positivos de bioacumulación en los sistemas podría interpretarse como un resultado de las concentraciones de mercurio en el agua. A mayor concentración de mercurio en el agua mayor probabilidad de generar patrones positivos de bioacumulación y en especial en las especies carnívoras de nivel trófico más alto. El río San Martín presenta menos concentración de mercurio (cf. Parte II) y todas las especies presentan patrones neutros de bioacumulación por lo que a ningún nivel trófico la cantidad de mercurio disponible es suficientemente alta como para generar un enriquecimiento de sus tejidos. Por el contrario en los ríos Blanco y Iténez, las cantidades de mercurio disponible son altas como para generar una acumulación en los músculos, favoreciendo la aparición de patrones positivos en las especies carnívoras de más alto nivel (como el bentón, *H. malabaricus*, el pez cachorro, *A. altus* y la piraña roja *P. nattereri* en los ríos Iténez y Blanco). Luego si la concentración de mercurio en el agua es todavía más alta, los patrones positivos aparecen en las especies de nivel trófico intermedio (como la sardina, *T. angulatus* en el río Blanco), dejando como en el caso del río Iténez, las especies de nivel trófico inferior libre de bioacumulación (como la llorona *C. cf. Alburna* y el piao del campo, *S. fasciatus*). Si este resultado se confirmaría en otros estudios, la aparición de patrones de bioacumulación a los diferentes niveles tróficos se volvería una herramienta de estimación del nivel de contaminación. En muchos artículos estas conclusiones están limitadas por el tamaño de la muestra (es decir el número de individuos estudiados). Mientras más individuos se analizan mayor es la probabilidad que el patrón de bioacumulación observado no cambie (Barbosa *et al.* 2003), sin embargo hasta la fecha ningún estudio pudo destacar un número mínimo de individuos a incluir en los análisis. Los patrones presentados incluyen un número de individuos (entre 14 y 27) que es superior al número de individuos estudiados en otros casos.

En las especies que presentaron patrón lineal positivo se realizó la corrección de las tasas de mercurio para realizar comparaciones de éstas entre el río Iténez y los dos ríos de la zona de referencia (Figura III.2).

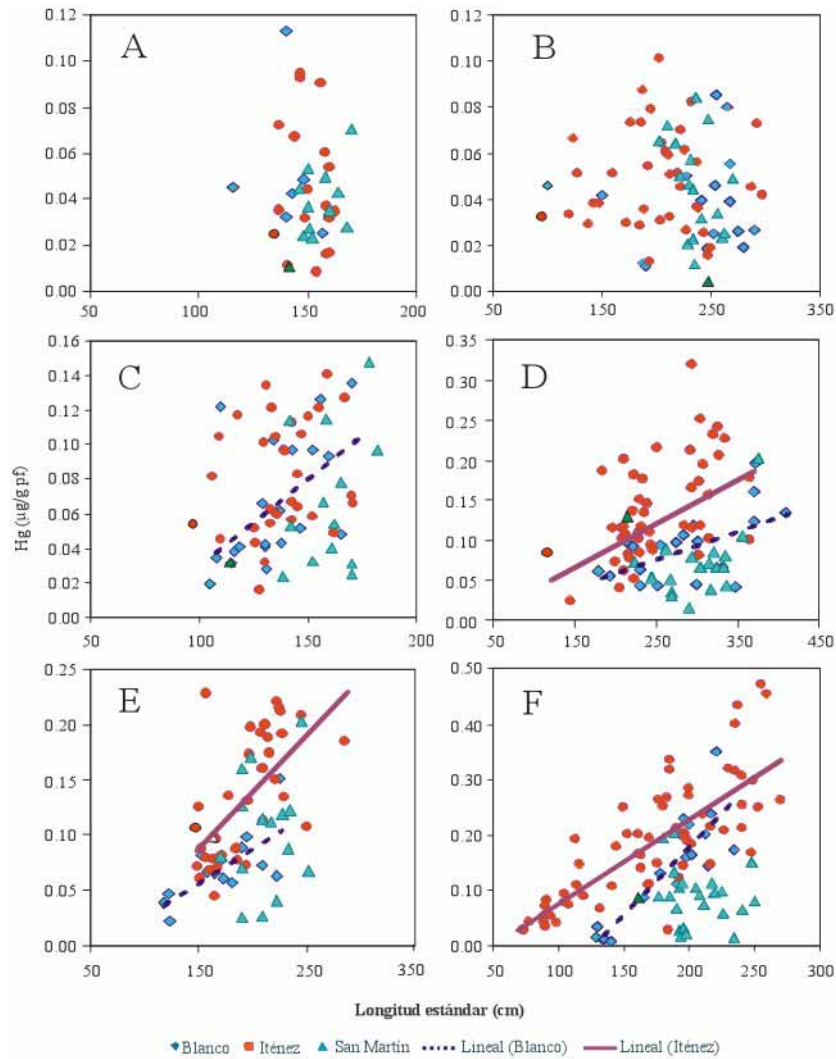


Figura III 2- Patrones de bioacumulación en peces de los ríos Iténez (círculos), Blanco (rombos) y San Martín (triángulos). A) *Curimatella cf. alburna*, B) *Piado del campo (Schizodon fasciatus)*, C) *Sardina (Triportheus angulatus)*, D) *bentón (Hoplias malabaricus)*, E) *Pez cachorro (Acestorhynchus altus)* y F) *Piraña roja (Pygocentrus nattereri)*.

III.3.2- Relación de las concentraciones de mercurio y el isótopo de nitrógeno estable en 6 especies

La cantidad relativa de isótopo estable de nitrógeno ($\delta^{15}\text{N}$) es un indicador de la posición trófica de los individuos y de la estructura trófica de una comunidad (en especial del largo de la cadena alimenticia). El ^{15}N es biomagnificable, es decir que su concentración incrementa de un nivel trófico inferior a otro superior (Vander Zanden & Fetzer 2007). Para los peces amazónicos, Jepsen & Winemiller (2002) estiman que la tasa de ^{15}N incrementa de 2.8‰ entre dos niveles tróficos sucesivos, esa tasa es conocida como el factor de enriquecimiento del nitrógeno.

La relación entre las tasas de ^{15}N y las concentraciones de mercurio es un indicador de la influencia del nivel trófico, de una población o de un individuo, sobre el mercurio en los organismos vivos (Bowles *et al.* 2001). En las seis especies estudiadas se determinó que predomina la ausencia de relación entre estas dos variables y este tipo de relación es frecuentemente reportada en peces (Bowles *et al.* 2001, Da Silva *et al.* 2005) y sugiere que las diferencias de posición trófica entre individuos de una misma población no es lo suficiente alta como para explicar las diferencias en las tasas de mercurio. Sin embargo, la población de piraña roja (*P. nattereri*) del río San Martín y la población de bentón (*H. malabaricus*) del río Iténez presentan una relación linear positiva entre estas variables (Figura III.3). En el río Tapájos (Brasil), se ha reportado que la piraña roja presenta un patrón linear positivo (Da Silva *et al.* 2005), lo que podría encontrarse relacionado con los hábitos omnívoros y el oportunismo alimenticio de la especie, que podría determinar un cambio en las fuentes de alimento que consume a medida que crece. En nuestro estudio sólo se presentó esta relación en la población del río San Martín. En el caso del bentón es la primera vez que se reporta este tipo de patrón y no es posible indagar acerca de sus causas.

Como en el caso de los patrones de bioacumulación (Hg vs. tamaño), el número de individuos incorporados en el análisis puede ser determinante para la detección de patrones significativos y robustos. Pérez (2008) utilizando un menor número de individuos (14 individuos, submuestro de los datos presentados en este informe), observó una relación positiva para esta especie en la población del río San Martín, que no se observa con la inclusión de individuos adicionales. Eso indica que se necesita un enfoque de investigación sobre el número de individuos mínimo a incluir para asegurar que los patrones observados sean robustos y no factuales. También estimamos que la implementación de test de permutación (confrontación del patrón observado a otros generados aleatoriamente) podría ser de utilidad para asegurar las pertinencias de los patrones observados.

En las especies que presentaron relación linear positiva entre el mercurio y el $\delta^{15}\text{N}$ se realizó correcciones de las tasas de mercurio para eliminar el efecto de los cambios en la posición trófica de la especie.

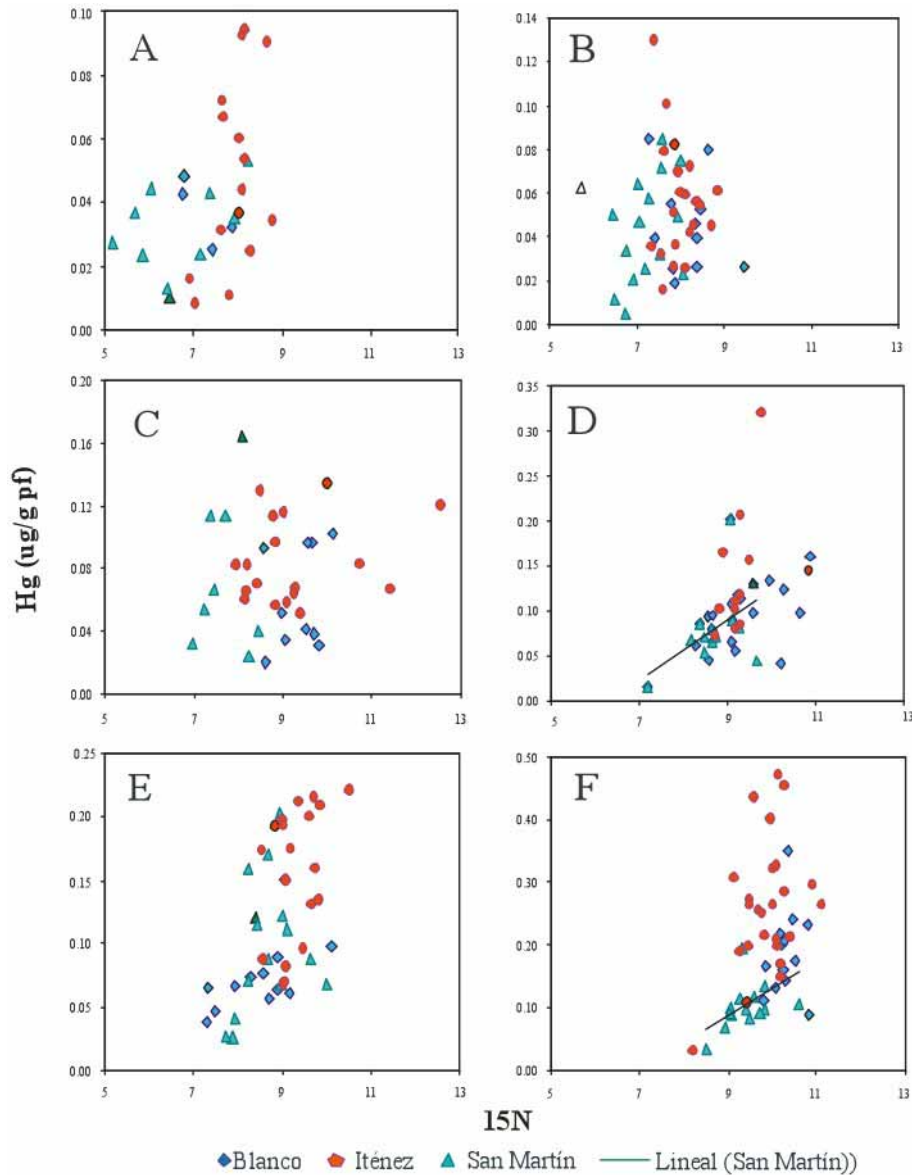


Figura III 3- Relación entre $\delta^{15}N$ y concentración de mercurio en peces de los ríos Iténez (círculos), Blanco (rombos) y San Martín (triángulos). A) *Curimatella cf. alburna*, B) Piao del campo (*Schizodon fasciatus*), C) Sardina (*Triportheus angulatus*), D) bentón (*Hoplias malabaricus*), E) Pez cachorro (*Acestorhynchus altus*) y F) Piraña roja (*Pygocentrus nattereri*).

III.3.3- Comparación de las concentraciones de mercurio en los ríos Iténez, Blanco y San Martín

En general y para las seis especies estudiadas, los peces del río Iténez presentan mayores concentraciones de mercurio que los dos ríos de la zona de referencia natural (Figura III.4). Las menores concentraciones de mercurio varían entre los ríos de referencia, lo que indica que es posible que la alimentación de estas especies en estos dos ríos sea diferente en relación a la disponibilidad de alimento en cada uno. En el caso del Iténez, las mayores concentraciones pueden estar relacionadas con el impacto antrópico que se ejerce en la zona (agricultura, ganadería y minería, entre otros).

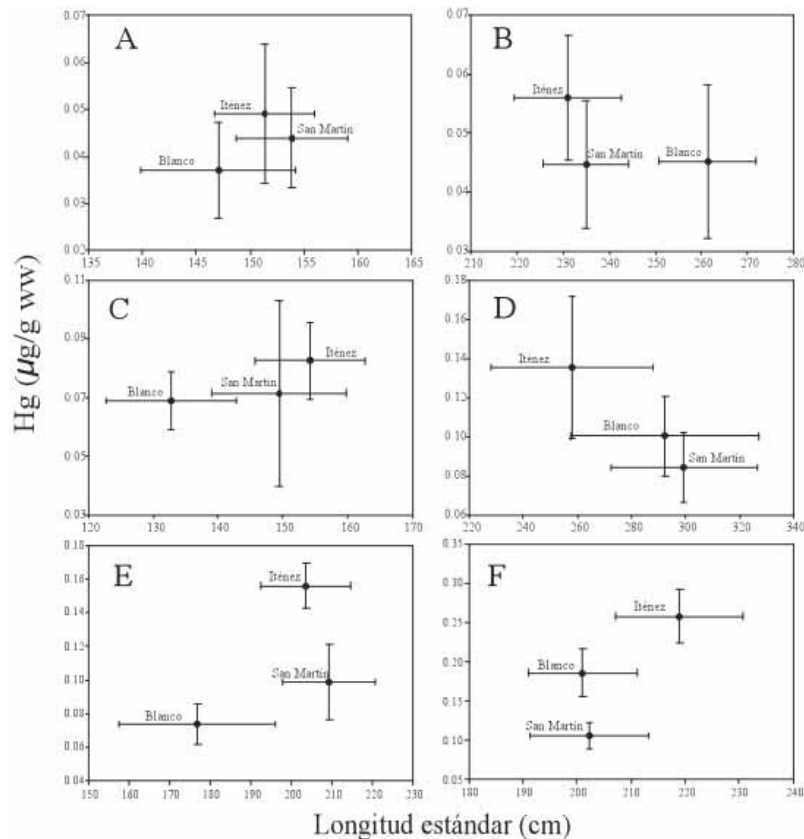


Figura III 4- Comparación de las tasas de mercurio corregido de seis especies en la cuenca del río Iténez A) *Curimatella cf. alburna*, B) *Piado del campo (Schizodon fasciatus)*, C) *Sardina (Triportheus angulatus)*, D) *bentón (Hoplias malabaricus)*, E) *Pez cachorro (Acestrotrhynchus altus)* y F) *Piraña roja (Pygocentrus nattereri)*. Las líneas horizontales representan la variabilidad del error estándar de la longitud estándar y las líneas verticales representan la variabilidad del 1.96 de error estándar de las tasas de mercurio corregidas.

III.3.4- Biomagnificación

La biomagnificación del mercurio es el incremento de las concentraciones de mercurio entre niveles tróficos (Stiling 1999). En este estudio, fue determinada a partir de las medias de mercurio, corregido por la longitud estándar y las tasas de ^{15}N , de los seis gremios tróficos en los que se incluyen las 33 especies estudiadas.

La tendencia de biomagnificación muestra un incremento entre niveles tróficos de las tasas de mercurio con alguna variabilidad en el orden de aparición de los gremios tróficos entre el río Iténez y los dos ríos de referencia (Figura III.5). Esta variabilidad posiblemente esté relacionada con la composición específica y el número de individuos por especie de los gremios tróficos en cada río. Sin embargo los peces con hábitos alimenticios no carnívoros se ubican en la parte baja de la relación; mientras que los carnívoros están en la zona superior. En general este tipo de tendencia es altamente aceptada en los estudios de mercurio en peces Amazónicos y del mundo (Boischo *et al.* 1995, Lebel *et al.* 1997, Castilhos & Bidone 2000).

Los peces zooplanctívoros presentan concentraciones de mercurio altamente variables entre los tres ríos, este grupo está formado por tres individuos en el Iténez y seis individuos en la zona de referencia (dos en el río Blanco y cuatro en el San Martín), por lo que sus concentraciones pueden no ser representativas del estado de contaminación de estos peces en los diferentes ríos.

En general la tendencia de biomagnificación encontrada en el río Iténez se caracteriza por presentar valores de mercurio más elevados que en los ríos de referencia, y en el río San Martín estas concentraciones son inferiores para todos los gremios tróficos.

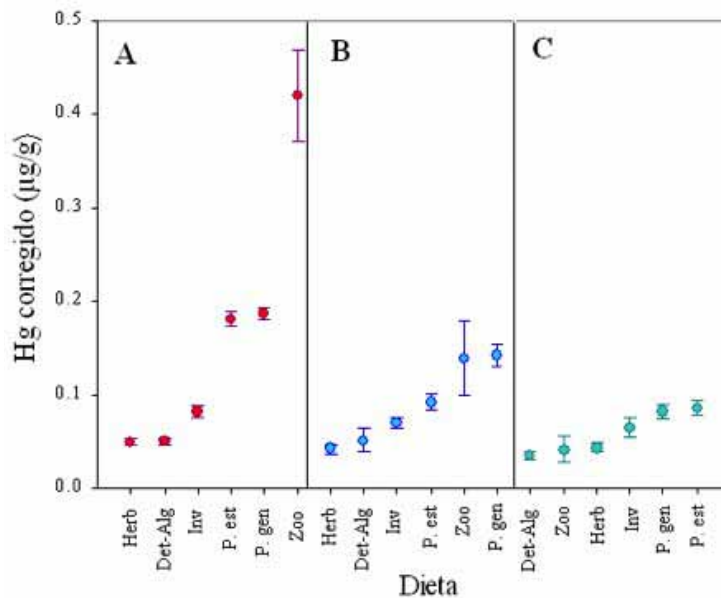


Figura III 5- Biomagnificación del mercurio en relación a seis gremios tróficos de peces (según Pouilly et al. 2004. A) río Iténez, B) río Blanco y C) río San Martín. La concentración de mercurio de los peces zooplanctívoros ha sido determinada a un reducido número de individuos por lo que los valores pueden no ser representativos del gremio.

III.3.5- Factor de biomagnificación, largo de cadena y factor de contaminación

El factor de biomagnificación del mercurio se calculó como la diferencia de promedio de tasa de mercurio entre el primer (detritívoro) y último (piscívoro) gremio trófico de cada río. El río Iténez presentó un valor de 8.5; mientras que los ríos de referencia presentaron valores inferiores a 3.5 (3.4 en el río Blanco y 2.4 en el río San Martín).

Existe una hipótesis que plantea que la biomagnificación del mercurio es dependiente del largo de cadena, prediciendo que mientras más larga es la cadena, mayor es la cantidad de mercurio que los individuos de los gremios tróficos superiores asimilan por vía oral. El largo de cadena es menor en el río Iténez (2.66) que en los ríos Blanco y San Martín (2.79 en el Blanco y 2.98 en el San Martín). Por lo tanto el río Iténez debería tener un factor de biomagnificación menor a los dos otros ríos, lo que es contradictorio con las tendencias observadas. Consideramos en este caso, que la relación entre los valores del factor de biomagnificación y largo de cadena es un buen indicador de la

contaminación y la denominamos “factor de contaminación”. El río Iténez presenta un factor de contaminación significativamente superior (3.2) a los encontrados en los dos ríos de la zona de referencia (1.2 en el río Blanco y 0.81 en el río San Martín).

Estos resultados permiten inferir que la actividad antrópica (agrícola, ganadera y minera principalmente) que aportan altas tasas de sedimentos a las aguas de este río (parte II), determinan un incremento en las concentraciones de mercurio de los peces. Esto puede ser corroborado por los resultados encontrados en la zona de referencia en la que los dos ríos que se consideraron difieren principalmente en sus cargas sedimentarias, siendo el río con mayor carga de sedimentos (río Blanco) el que presenta peces con mayores concentraciones de mercurio. En otros trabajos comparativos entre ríos de diferentes calidades de agua en la cuenca Amazónica, se ha encontrado que la actividad antrópica determina un incremento en las concentraciones de mercurio en peces (Kering & Malm 1991). En otros casos, aunque no realizan trabajos comparativos que relacionan las actividades antrópicas con las concentraciones de mercurio en peces, se ha encontrado que bajo condiciones naturales los ríos con bajas cargas sedimentarias suelen presentar comunidades de peces con menor tasa de mercurio (Maurice-Bourgoin & Quiroga 2002, Lopez 2005).

III.3.6- Especies comerciales

Se estudiaron ocho especies comerciales, de las cuales el surubí (*Pseudoplatystoma fasciatum*), tucunaré (*Cichla monoculus*), la piraña roja (*Pygocentrus nattereri*) y el bentón (*Hoplias malabaricus*), las cuales se encuentran bien representadas en los diferentes sectores del Iténez; el pacú (*Colossoma macropomum*), el general (*Phractocephalus hemiliopterus*), la corvina (*Plagioscion squamosissimus*) y el pintado/chanquina (*Pseudoplatystoma tigrinum*) solo fueron capturadas en una de las zonas estudiadas (Iténez o referencia). Este análisis se basó sobre las concentraciones de mercurio cuantificadas en laboratorio y en los casos que fue necesario corregidas por el tamaño (LS) y los cambios de posición trófica (^{15}N) (Tabla III.2 en anexo).

Las tasas de mercurio de todos los sectores del río Iténez se encuentran por encima de la zona de referencia, siendo significativa en los casos del bentón y la piraña roja (Figura III.6). Las tasas de mercurio entre sectores del Iténez en general disminuyen desde el sector del Alto Iténez hacia Remanso, Mategua y Versailles, a excepción de la población de tucunaré en Versailles que presenta tasas de mercurio elevadas; esto puede deberse al reducido número de individuos (cinco) y queda entonces por confirmar. El área de influencia de la contaminación por el mercurio empleado en la amalgamación y los sedimentos removidos en las minas auríferas puede alcanzar 150 Km² (Roulet 2001). Aunque este impacto no ha sido probado en peces, nuestros resultados podrían interpretarse, por lo menos parcialmente como un indicio del efecto de la mina de San Simón sobre las concentraciones de mercurio en los peces. Siguiendo esta área de influencia, la mina de San Simón podría tener efectos hasta la población de Mategua; sin embargo en la zona de Versailles se encuentran tasas de mercurio incluso superiores a las encontradas en la zona de Mategua, lo que

sugiere que en este caso existen otros factores como la entrada de sedimentos desde las cuencas brasileras degradadas por la deforestación pueden estar jugando un rol en la concentración de mercurio en peces.

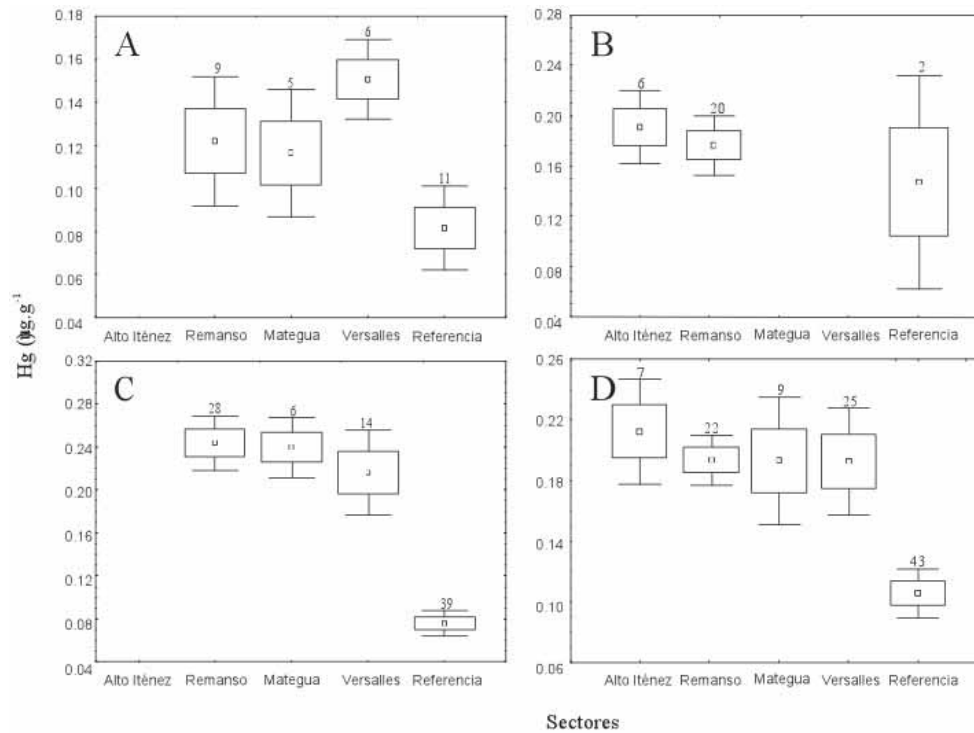


Figura III 6- Concentraciones de mercurio para cuatro especies de peces comerciales en diferentes sectores del río Iténez (Alto Iténez, Remanso Mategua y Versalles) y de una zona de referencia natural (Bella Vista). A) tucunaré (*Cichla monoculus*), B) surubí (*Pseudoplatystoma fasciatum*) C) bentón (*Hoplias malabaricus*) y D) piraña roja (*Pygocentrus nattereri*). Los cuadrados pequeños representan la media, los cuadrados más grandes representan la desviación estándar y las líneas representan 1.96 del error estándar. El número de individuos está indicado encima de cada cuadrado. Las concentraciones de mercurio de la zona de referencia se encuentran por debajo de las concentraciones de los diferentes sectores del Iténez.

La bioacumulación del mercurio en relación al tamaño de los individuos es preocupante debido que implica que mientras más grandes son los organismos mayor es su tasa de mercurio, y éstos son los más apreciados tanto para el consumo como para la comercialización. Otro factor de preocupación es la ubicación trófica de estas especies. La mayor parte de las especies comerciales son de hábitos alimenticios carnívoros (Pouilly *et al.* 2004), a excepción del pacú, lo que determina que sus tasas de mercurio se encuentren por encima de las demás especies omnívoras o piscívoras. Estos dos factores: tamaño y ubicación trófica de estas especies influyen en las tasas de mercurio que las poblaciones humanas asimilan, dado que el mercurio contenido en el alimento es de fácil asimilación para los seres humanos. Por lo tanto se puede concluir que, aunque los valores encontrados en las poblaciones del Iténez se encuentran por debajo del límite de riesgo (Parte IV), las poblaciones ribereñas del río Iténez están expuestas a contaminación por mercurio y que ésta debería ser monitoreada.

III.4- Conclusiones

Los patrones de bioacumulación en todas las poblaciones estudiadas son de tipo neutro y lineal positivo. El patrón neutro implica que el tamaño de los organismos no determina el contenido de mercurio en peces, y el patrón lineal positivo determina un incremento en las tasas de mercurio de los organismos a medida que estos son más grandes. La influencia de la posición trófica de los organismos sobre las tasas de mercurio es evidente en aquellas especies que presentan una relación lineal entre las tasas de ^{15}N y las concentraciones de mercurio en una población. Las relaciones lineales de bioacumulación, así como entre el ^{15}N y el mercurio son más frecuentes en especies de hábitos alimenticios carnívoros. Sin embargo en las poblaciones que presentan relaciones lineales es necesario excluir su efecto para poder realizar comparaciones entre poblaciones de diferentes especies o diversas procedencias.

Las concentraciones de mercurio en cualquier población de peces del río Iténez son superiores a las encontradas en la zona de referencia, lo cual no se encuentra determinado por la biomagnificación ni el largo de cadena alimenticia. La tendencia de la biomagnificación es similar y positiva para los tres ríos y muestra que las especies con hábitos alimenticios no carnívoros presentan menores tasas de mercurio que aquellas que consumen algún tipo de proteína animal en su dieta. Sin embargo el factor de biomagnificación del mercurio entre especie de bajo y alto nivel trófico, es mayor en el río Iténez en relación a los otros dos ríos en la zona de referencia. Por otro lado, el largo de cadena alimenticia (determinado por la diferencia de ^{15}N entre especie de bajo y alto nivel trófico) es inferior en el río Iténez en relación a los ríos Blanco y San Martín. La hipótesis es que a menor largo de cadena la biomagnificación del mercurio debería ser inferior, lo no se observa en los ríos estudiados, sugiriendo la contaminación del río Iténez. Las altas tasas de mercurio encontradas en los peces del río Iténez no son naturales y probablemente están influenciadas por la actividad antrópica, principalmente la deforestación y la minería que impactan esa cuenca. Para cuantificar esa contaminación propusimos un factor de contaminación que relaciona la biomagnificación del mercurio con el largo de cadena.

Las especies comerciales presentan altas tasas de mercurio, debido a que en general son de hábitos alimenticios carnívoros lo que las coloca en la cima de la cadena alimenticia y por lo tanto en la parte superior de la tendencia de la biomagnificación. Además los individuos de mayor tamaño son apreciados para el consumo lo que se encuentra influenciado por los patrones de bioacumulación lineares positivos propios de especies carnívoras, reportado en este estudio para varias de las poblaciones de especies comerciales (a excepción de las poblaciones del río San Martín).

Por otro lado, las tasas de mercurio en peces a lo largo del río Iténez, mostró una tendencia a disminuir las concentraciones de mercurio a medida que los puntos de muestreo se alejan de la mina (alto Iténez), sin embargo estos aparentes valores elevados en la zona del alto Iténez no pueden ser simplemente atribuidos al efecto de la mina San Simón debido a que en la zona de Versalles (alejada

de la supuesta área de influencia de una mina de 150 Km) las concentraciones de mercurio, en algunos casos son mayores a las de la zona de Mategua que aún se encuentra bajo la zona de influencia. Por lo que en el Iténez las tasas de mercurio en peces podrían encontrarse altamente influenciadas por la agricultura y ganadería, además de la mina de la serranía San Simón.

III.5- Bibliografía

- Bastos W.R., De Almeida R., Dorea J.G. & Barbosa A.C. 2007. Annual flooding and fish-mercury bioaccumulation in the environmentally impacted Rio Madera (Amazon). *Ecotoxicology* 16: 341-346
- Barbosa A.C., De Souza J., Dórea J.G., Jardim W.F. & Fadini P.S. 2003. Mercury biomagnification in tropical black water, Rio Negro, Brazil. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 45: 235-246
- Boischo A.A.P., Henshel D. & Barbosa A.C. 1995. Mercury exposure through fish consumption by the upper Madeira river population, Brazil - 1991. *Ecosystem Health* 1 (3): 177-192
- Bowles K.C., Apte S.C., Maher W.A., Kawei M. & Smith R. 2001. Bioaccumulation and biomagnification of mercury in Lake Murray, Papua New Guinea. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 58: 888-897
- Cabana G.Y. & Rasmussen J.B. 2002. Modelling food chain structure and contaminant bioaccumulation using stable nitrogen isotopes. *Nature* 372: 255 – 257
- Castilhos Z.C. & Bidone E.D. 2000. Hg biomagnification in the ichthyofauna of Tapajós river region, Amazonian, Brazil. *Environmental Contamination and Toxicology* 64: 693-700
- Da Silva D.S., Lucotte M., Roulet M., Poirier H., Mergler D., Santos E.O. & Crossa M. 2005. Trophic structure and bioaccumulation of fish of there natural lakes of the Brazilian Amazon. *Water, Air, and Soil Pollution* 165: 77-94
- Deza N.E.A. 1997. Mercury accumulation in fish from Madre de Dios, a gold mining area in Amazon basin, Peru. Thesis for master of science. Oregon State University. pp: 34
- Dorea J.G., Barbosa A.C. & Silva G.S. 2006. Fish mercury bioaccumulation as a function of feeding behavior and hydrological cycles of the Rio Negro, Amazon. *Comparative Biochemistry and Physiology, Part C* (142): 275-283
- Hylander L.D., Pinto F.N., Guimarães, J-R.D., Meili M., Oliveira L.J. & de C. e Silva E. 2000. Fish mercury concentration in the Alto Pantanal, Brazil: influence of season of and water parameters. *The Science of Total Environment* 261: 9-20
- Jepsen D.B. & Winemiller K.O. 2002. Structure of tropical river food webs revealed by isotope ratios. *Oikos* 96(1): 46-55
- Kehring H. & Malm O. 1999. Methylmercury in fish as tool for understanding the Amazon mercury contamination. *Applied Organometallic Chemistry* 13: 689-696
- Lacerda L.D., Bidone E.D., Guimarães A.F. & Pfeiffer W.C. 1994. Mercury concentration in fish from the Itacaiúnas-Parauapebas River system, Carajás region, Amazon. *An. Acad. Bras.* 66 (3): 373-379
- Lebel J., Roulet M., Mergler D., Lucotte M. & Larribe F. 1997. Fish diet and mercury exposure in riparian Amazonian population. *Water, Air and Soil Pollution* 97: 31-44
- López E.I.S. 2005. Bioacumulación y biomagnificación de mercurio en diferentes poblaciones de peces en la amazonía boliviana. Tesis para obtener el grado de Magíster of Scientiae en Ecología y Conservación. Universidad Mayor de San Andrés. pp.: 85-89
- Maurice-Bourgoin L. & Quiroga I. 2002. Total mercury distribution and importance of the biomagnification process in rivers of the Bolivian Amazon. *The Ecohydrology of South American Rivers and Wetlands* 6: 49-67
- Moreno D. 2003. *Toxicología Ambiental: Evaluación de riesgo para la salud humana*. Ed. McGraw-Hill/Interamericana. España. pp. 214– 220.
- OMS. 1990. Methylmercury. *Environmental health Criteria* 101. Organización Mundial de la Salud. Geneva
- Pérez R.T. 2008. Bioacumulación y biomagnificación del mercurio en peces de la Cuenca del Iténez (Bolivia). Tesis de Magíster of Scientiae en Ciencias Ambientales. Universidad Mayor de San Simón. pp.: 1-90

- Pouilly M., Yunoki T., Rosales C. & Torres L. 2004. Trophic structure of fish assemblages from Mamoré river floodplain lakes (Bolivia). *Ecology of freshwater Fishes* 13: 245-257
- Roulet M. 2001. Le mercure: son cycle biogéochimique et sa répartition aux échelles planétaire et amazonienne. En: Carmouze J.P., Lucotte M. & Boudou A. (Eds). *Le mercure en Amazonie: Rôle de l'homme et de l'environnement, risques sanitaires*. IRD éditions. Paris. Francia. pp. 81-120
- Stiling P. 1999. *Ecology: theories and applications*. Prentice Hall. Upper Saddle River. 3ra Ed. New Jersey. USA. pp. 519-539
- Uryu Y., Malm O., Thornton I., Payne I. & Cleary D. 2001. Mercury contamination of fish and its implications for other wildlife of the Tapajos basin, Brazilian Amazon. *Conservation Biology* 15 (2): 438-446
- Vander Zanden M.J., Cabana G. & Rasmussen J.B. 1997. Comparing trophic position of freshwater fish calculated using stable nitrogen isotope ratios ($\delta^{15}\text{N}$) and literature dietary data. *Can. J. Aquat. Sci.* 54: 1142-1158
- Vander Zanden M.J. & Fetzer W.W. 2007. Global patterns of aquatic food chain length. *Oikos* 116: 1378-1388

Tabla III.2- Análisis de regresión lineal múltiple de las concentraciones de mercurio [Hg]c por la longitud estándar (LS), el $\delta^{15}N$ de 21 especies de peces colectados en los ríos Iténez, Blanco y San Martín. El modelo utilizado es de tipo $[Hg]c = \alpha LS + \gamma \text{Log}(15N) + b$. Los coeficientes α y γ asociados a cada variable así que el valor de intercepto b son inscritos en la tabla cuando son significativos.

Dieta/Especie	Río	n	α	γ	b	Prob	R2
Detrívoros - Alguívoros							
<i>Curimatella cf. alburna</i>	Blanco	6				pocos individuos	
	Iténez	18				n/s	
	San Martín	12				n/s	
<i>Hemiodus unimaculatus</i>	Iténez	10				n/s	
<i>Potamorhina latior</i>	San Martín	3				pocos individuos	
<i>Psectrogaster essequibensis</i>	Iténez	39				n/s	
<i>Psectrogaster rutiloides</i>	San Martín	1				pocos individuos	
Herbívoros							
<i>Colossoma macropomum</i>	Blanco	4				pocos individuos	
	Iténez	1				pocos individuos	
<i>Schizodon fasciatus</i>	Blanco	16				n/s	
	Iténez	40				n/s	
	San Martín	18				n/s	
Invertívoros							
<i>Bryconops sp.</i>	Blanco	1				pocos individuos	
<i>Triportheus angulatus</i>	Blanco	21	0,0010		-0,072	0,01	0,30
	Iténez	32				n/s	
	San Martín	14				n/s	
Zooplancívoros							
<i>Hypophthalmus edentatus</i>	Blanco	2				pocos individuos	
	Iténez	3				n/s	
<i>Hypophthalmus marginatus</i>	San Martín	4				n/s	
Piscívoros estrictos							
<i>Acestrorhynchus altus</i>	Blanco	14	0,0006		-0,036	0,04	0,34
	Iténez	37	0,0010		-0,065	>0,0001	0,39
	San Martín	16				n/s	
<i>Acestrorhynchus microlepis</i>	San Martín	4				pocos individuos	
<i>Ageneiosus brevifilis</i>	Iténez	1				pocos individuos	
<i>Cichla pleiozona</i>	Iténez	20	0,0004		-0,012	0,002	0,44
	San Martín	11				n/s	
<i>Hoplias malabaricus</i>	Blanco	20	0,0003		-0,004	>0,0001	0,45
	Iténez	48	0,0016	0,298	-0,668	>0,0001	0,38
	San Martín	19				n/s	
<i>Phractocephalus hemiliopterus</i>	Iténez	9	0,0006		-0,213	>0,0001	0,60
<i>Plagioscion squamosissimus</i>	Blanco	10				n/s	
	Iténez	2				pocos individuos	
Piscívoros generalistas							
<i>Pseudoplatystoma fasciatum</i>	Blanco	1				pocos individuos	
	Iténez	28	0,0004		-0,035	>0,001	0,66
	San Martín	1				pocos individuos	
<i>Pseudoplatystoma tigrinum</i>	Iténez	5				pocos individuos	
<i>Pygocentrus nattereri</i>	Blanco	18	0,0024		-0,299	>0,0001	0,86
	Iténez	64	0,0150		-0,078	>0,0001	0,63
	San Martín	25		0,4143	-0,822	0,04	0,28