



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE CIENCIAS.**

**“Arrastre generado por un ornamento  
en machos del género *Xiphophorus*”**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**BIÓLOGO**

**P R E S E N T A:**

**DAVID GUTIÉRREZ BONILLA.**

**DIRECTORA DE TESIS:**

**DOCTORA GUILLERMINA ALCARAZ ZUBELDIA**



**2005**



m. 344046





UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.  
NOMBRE: David Gutiérrez Bonilla

FECHA: 11 Mayo 2005

FIRMA: David Gutiérrez B.

**ACT. MAURICIO AGUILAR GONZÁLEZ**  
**Jefe de la División de Estudios Profesionales de la**  
**Facultad de Ciencias**  
**Presente**

**Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo escrito:**

" Arrastre generado por un ornamento en machos del género Xiphophorus"

realizado por David Gutiérrez Bonilla

con número de cuenta 09524079-8 , quien cubrió los créditos de la carrera de: Biología

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

**Atentamente**

Director de Tesis Propietario Dra. Guillermina Alcaraz Zubeldia

Propietario Dra. Ruth Cecilia Vanegas Pérez

Propietario Dr. Ramón Peralta y Fabi

Suplente Dr. Fernando Alvarez Noguera

Suplente Dr. Francisco Xavier Chiappa Carrara

**Consejo Departamental de Biología**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

M. en C. Juan Manuel Rodríguez Chávez.



UNIDAD DE ENSEÑANZA  
DE BIOLOGÍA

## Dedicatorias.

A mi Madre y amiga Xochitl Bonilla Pedroza por su apoyo incondicional, amor y comprensión. Por contagiarme de su gran fuerza y carácter ante la vida. Por enseñarme a ser una mejor persona.

A mi padre David Gutiérrez Morell por su amistad y cariño que siempre me ha brindado.

A mi hermana y amiga Ma. Esther Gutiérrez Bonilla por enseñarme hacer complicado lo sencillo y lo sencillo complicado. Por enseñarme a crecer y a entender las cosas de otra manera.

A mis abuelos Carmen Pedroza y Rafael Bonilla que me han servido de ejemplo y apoyo en mi superación personal.

A mis tíos Jorge Gutiérrez y Guadalupe Castillo por ser mis segundos abuelos y brindarme siempre su apoyo.

A Diana Bermejo Quintana por estar siempre conmigo, por simbolizar una mayor motivación en mi vida. Por darme fuerzas para continuar este trabajo de resistencia.

A mi amiga Vanesa por estar siempre conmigo y servirme de apoyo.

Y a todas las personas que me brindan su amistad incondicional: Luz, Angelita, Maribel, Paulina, Ángel, Blanca, Zack, Toño, Acaxel, Mocte, Yenelli, Ricardo, Carlos, Carmen, Flama, Zoe, Cuahtli, Jacobo, Memo, Nancy y los que me faltaron.

## **Agradecimientos.**

A la UNAM como aquella institución que me permitió conocer la Biología como la ciencia de la vida y por enseñarme que esta es más que una ciencia.  
oportunidad de conocer a grandes amigos y académicos.

A la Dra. Guillermina Alcaraz Zubeldia, por sus aportaciones en la construcción de los saberes que se reflejan en esta obra. Por brindarme su apoyo, tiempo y dedicación para el desarrollo de este trabajo de investigación. Por su amistad, sencillez e interés en mi desarrollo académico. Y sobre todo, por los ratos amenos de charlas y risas que muestran su calidad humana fuera del mundo académico.

A los miembros del jurado, Dra. Ruth Cecilia Vanegas Pérez, Dr. Ramón Peralta y Fabi, Dr. Fernando Alvarez Noguera, Dr. Francisco Xavier Chiappa Carrara por sus contribuciones para el mejoramiento de esta obra.

A la Dra. Ruth Cecilia Vanegas Pérez por la revisión esmerada de esta investigación. Por sus correcciones, sugerencias y aportaciones constructivas. Y además por esa calidad humana que reflejas.

Al Dr. Francisco Xavier Chiappa Carrara por su asistencia en los análisis estadísticos.

Al Dr. Ramón Peralta y Fabi por su gran apoyo y disposición para este trabajo de investigación.

Al Dr. Fernando Alvarez Noguera por sus consejos y mejoras que realizo al trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado a través del Proyecto de Investigación IN31728.

A Cuahtli Bonilla Pedroza por el apoyo y disposición para realizar los videos que se presentaron en este trabajo.

A los Sres. Jesús Sáenz, Coordinador de Servicios del taller mecánico de la Facultad de Ciencias y A Benjamín Díaz por su gran apoyo en la construcción del sistema experimental utilizado en esta investigación.

A Maribel Bobadillo, Karla Kruesi y Sebastián Zúñiga por brindarme tanto apoyo técnico, como algunos consejos para mejorar la eficacia del trabajo además de su amistad.

El esquematismo narrativo (...) es un arte oculto en las profundidades del alma humana y de la cual será siempre difícil arrancar el verdadero mecanismo de la naturaleza para exponerlo delante de los ojos.

PAUL RICOEUR, en paráfrasis de Kant

## RESUMEN.

Los peces del género *Xiphophorus* son organismos que presentan un dimorfismo sexual muy marcado. El macho presenta una prolongación de los radios inferiores de su aleta caudal en forma de espada. La longitud de la espada en los machos de este género representa una ventaja adaptativa, dado que las hembras presentan una preferencia hacia los machos que tienen la estructura más desarrollada como pareja para la reproducción. A pesar de esto se han encontrado desventajas en otros términos. Se ha observado por una parte que al poseer una estructura tan colorida como lo es la espada, los machos son fácilmente detectados por sus depredadores naturales. Por otro lado se encontró que la espada representa desventajas en cuanto al desempeño de nado (velocidad crítica máxima) y en cuanto al consumo de oxígeno durante nado rutinario y de cortejo. Así, es posible pensar que el decremento en el desempeño de su nado y el aumento en el consumo de oxígeno puedan atribuirse al incremento en la resistencia al avance debido a la presencia de ornamento.

Con el objetivo de demostrar el costo asociado a la estructura, utilizando elementos puramente físicos, en la presente investigación se construyó un sistema experimental que permitió cuantificar el arrastre que sufría un organismo cuando se sometía a distintas velocidades de la corriente.

Los resultados de este trabajo mostraron que la estructura sí representa un mayor costo en términos hidrodinámicos; el arrastre fue mayor para los machos con espada a diferencia de los machos sin la estructura. Además el arrastre se incrementó con la longitud del ornamento.

La espada en el género *Xiphophorus* representa entonces una desventaja en términos hidrodinámicos ya que genera una mayor resistencia al avance. Así; aunque el portar espadas más largas resulta una ventaja en la reproducción para los machos, ya que son seleccionados por las hembras; estas estructuras confieren desventajas en la adecuación al medio, debido a que una mayor resistencia al avance significará entonces una menor eficiencia en el uso de la energía canalizada a la locomoción.

INDICE.

	PAG.
DEDICATORIAS	i
AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN	iii
INTRODUCCIÓN.	1
CARACTERÍSTICAS GENERALES DE <i>Xiphophorus</i> .	2
CARACTERÍSTICAS DE LA ESPADA.	3
HISTORIA FILOGENÉTICA DEL GRUPO.	5
COSTOS DE LOS ORNAMENTOS.	7
ANTECEDENTES.	9
ARRASTRE.	9
OBJETIVOS.	15
HIPÓTESIS.	16
MATERIAL Y METODOS.	17
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL.	17
ESPECÍMENES.	19
PREPARACIÓN DE LOS ORGANISMOS.	20
VALORES MERÍSTICOS.	21
PRUEBAS PREVIAS A LA MEDICIÓN DE ARRASTRE.	23
1.-ESTANDARIZACIÓN.	23
1.1 VELOCIDAD DE CORRIENTE.	23
1.2 ARRASTRE.	25
FASE EXPERIMENTAL.	26
1.-FASE EXPERIMENTAL I.	26
1.1 ARRASTRE CON ESPADA NATURAL Y ARTIFICIAL.	26
1.2 ARRASTRE CON Y SIN ESPADA.	27
2.-FASE EXPERIMENTAL II.	28
2.1 EFECTO DE LA TALLA Y LA VELOCIDAD SOBRE EL ARRASTRE.	28
2.2 EFECTO DE LA LONGITUD DE LA ESPADA Y LA VELOCIDAD DE LA CORRIENTE SOBRE EL ARRASTRE.	29
RESULTADOS	31
1.-ESTANDARIZACIÓN.	31
1.1 VELOCIDAD DE LA CORRIENTE.	31
1.2 ARRASTRE.	32
FASE EXPERIMENTAL.	33
1.- FASE EXPERIMENTAL I	33
1.1 ARRASTRE CON ESPADA NATURAL Y ARTIFICIAL.	33
1.2 ARRASTRE CON Y SIN ESPADA.	35
2.- FASE EXPERIMENTAL II.	38
2.1- EFECTO DE LA TALLA Y LA VELOCIDAD SOBRE EL ARRASTRE.	38
2.2. EFECTO DE LA LONGITUD DE LA ESPADA Y LA VELOCIDAD DE LA CORRIENTE SOBRE EL ARRASTRE.	42
DISCUSIÓN.	46
SISTEMA EXPERIMENTAL.	46
ARRASTRE CON ESPADA NATURAL Y ARTIFICIAL.	49
EFFECTO DE LA TALLA SOBRE EL ARRASTRE.	50
ARRASTRE GENERADO POR LA ESPADA.	53
CONCLUSIONES.	58
BIBLIOGRAFIA.	59

# ARRASTRE GENERADO POR UN ORNAMENTO EN MACHOS DEL GÉNERO *Xiphophorus*.

## INTRODUCCIÓN.

### POECILIDOS.

La familia Poeciliidae esta formada por peces relativamente pequeños, que no rebasan los 20 cm de longitud. Este grupo cuenta con 30 géneros con 293 especies aproximadamente. Se pueden encontrar en una gran variedad de habitats, que va desde zonas templadas a tropicales, y de zonas desérticas a húmedas. Pueden encontrarse en ambientes lóticos y lénticos (ríos, lagos, manantiales, costas marinas y manglares). En su mayoría todos son de aguas dulces, poco menos en aguas salobres y escasos en aguas marinas (Pez Mosquito, *Gambusia affinis* y "Molly", *Poecilia latipinna*; Nelson, 1994). De forma general se distribuyen en México, Norteamérica y este de Sudamérica, teniendo su máxima diversidad en América Central.

Los poecílicos son un grupo bien representado en el Neotrópico y su origen es central o sudamericano (Rosen y Bailey, 1963). Su dieta es variada pero en su mayoría son omnívoros (Endler, 1984). El éxito ecológico que presentan los poecilidos podría deberse a la gran capacidad adaptativa ya que pueden permanecer casi en cualquier ambiente, tolerando amplios intervalos de temperatura y salinidad (Meffe y Snelson, 1989).

La familia Poeciliidae está representada por dos subfamilias: Poeciliinae y Fluviphylacinae. La primera, representa a organismos vivíparos y la segunda a los organismos no vivíparos. Los machos de la subfamilia Poeciliinae

presentan una elongación del tercero, cuarto y quinto rayo de la aleta anal formando el gonopodio. Llegan a alcanzar una talla máxima de 18 cm (Nelson, 1994). Esta subfamilia se divide en dos supertribus: Tomeurini y Poeciliini. La primer supertribu está formada por un solo género y una única especie (*Tomeurus gracilis*), mientras que Poeciliini está formada por 30 géneros (Nelson, 1994) con unas 190 especies (Parenti y Rauchenberg, 1989), dentro de esta segunda supertribu se encuentra el género *Xiphophorus* (Meffe y Snelson, 1989).

#### CARACTERÍSTICAS GENERALES DE *Xiphophorus*.

El género *Xiphophorus* que pertenece a la supertribu Poeciliini está formado por 23 especies descritas, de las cuales 21 se encuentran en México (Espinoza *et al.*, 1993). Los peces del género *Xiphophorus* son organismos vivíparos de agua dulce. Se distribuyen en ríos poco profundos o arroyos de los afluentes de la cuenca del Golfo de México, Guatemala, Belice y Honduras (Rosen y Bailey, 1963). En México es donde se encuentra la mayor diversidad de especies de este género a nivel mundial, específicamente en la cuenca del río Pánuco que drena la Sierra Madre Oriental (Rauchenberger *et al.*, 1990). El periodo de vida de los peces de este género es de 3 años aproximadamente y el número de crías por puesta puede variar dependiendo de la especie, del tamaño y de la alimentación de la hembra (Álvarez, 1950).

Los organismos del género *Xiphophorus* son peces que presentan un dimorfismo sexual muy marcado. El macho presenta una prolongación de los radios inferiores de su aleta caudal en forma de espada. La aleta dorsal del macho es más desarrollada y su coloración es más intensa respecto a las hembras. Estas últimas son de mayor talla respecto al macho (Fig. 1).

En términos evolutivos, el género *Xiphophorus* ha servido como base para estudiar aspectos específicos de selección sexual, relacionados con la evolución de las preferencias sexuales y de los caracteres sexuales secundarios (Basolo, 1990a).

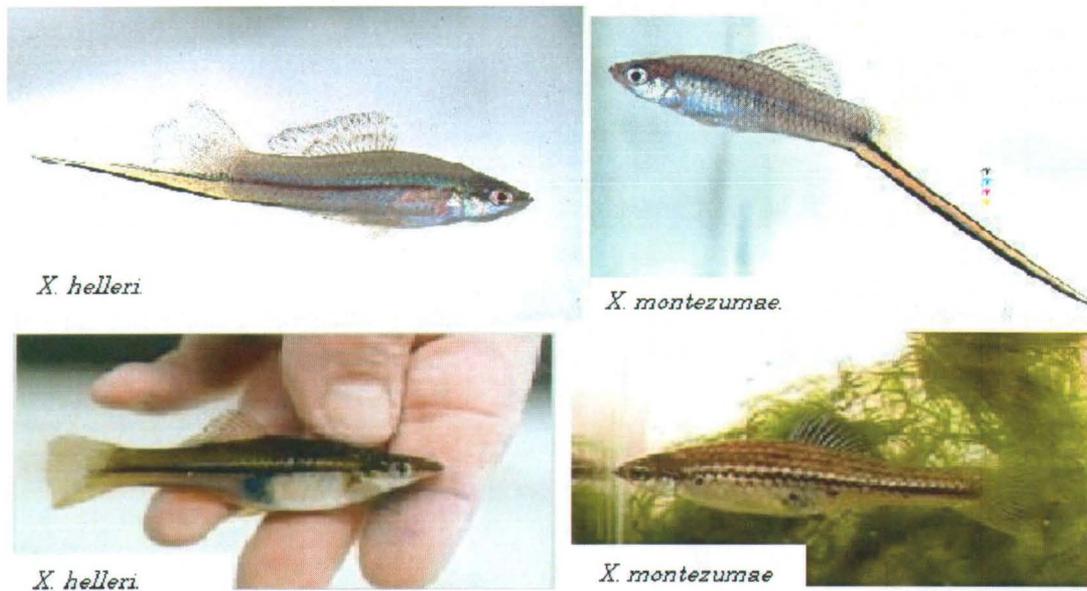


Fig. 1.- Dimorfismo sexual presente en organismo del género *Xiphophorus*. En las imágenes superiores se muestran los machos y en las inferiores las hembras correspondientes a cada especie. (*X. montezumae* y *X. helleri*).

### CARACTERÍSTICAS DE LA ESPADA.

La presencia de la espada en este género fue citada por Darwin (1871) como un ejemplo de una ornamentación sexual extrema. En algunas especies como *Xiphophorus montezumae* la prolongación de la aleta caudal de los machos puede ser más larga que la mitad de la longitud estándar (Fig. 1, Rauchenberger *et al.*, 1990).

La espada presente en el género *Xiphophorus* se presenta como un carácter sexual secundario, el cual se manifiesta cuando el macho alcanza la madurez

sexual. De acuerdo a Basolo (1998) la elongación de la espada está determinada genéticamente para cada especie más que ambientalmente.

La espada representa la expresión de un total de 9 caracteres accesorios, que son:

"p", habilidad genética para la expresión de una protuberancia en el extremo distal inferior de la aleta caudal (en algunas especies no se expresa al menos que se induzca de manera hormonal).

"P", expresión de la protrusión de la aleta caudal

"E", elongación

"C", coloración amarilla, verde o naranja.

"G", mancha gris.

"L", línea melanófora inferior

"PU", línea melanófora proximal superior,

"MDU", línea melanófora distal superior (se desarrolla desde la parte media de la espada hasta la punta de la espada).

"DMU", línea melanófora distal superior (se desarrolla desde el extremo distal de la espada hacia el extremo proximal).

A pesar de que la espada sólo se presenta en algunas especies del género *Xiphophorus*, la división taxonómica se basa en gran parte por la posesión o ausencia de la estructura. Los peces que carecen de la estructura se ubican en 9 especies, que comúnmente se les llama "platis". La longitud de la espada en los machos de este género representa una ventaja adaptativa (Basolo, 1996) dado que las hembras presentan una preferencia hacia los machos que presentan la estructura más desarrollada (Basolo, 1990b).

## HISTORIA FILOGENÉTICA DEL GRUPO.

Filogenéticamente el género *Xiphophorus* ha sido dividido en dos grupos en base a su distribución geográfica. El primer grupo está conformado por los organismos que geográficamente se localizan en el noroeste de México en las cuencas del río Pánuco, desde el suroeste de Tamaulipas hasta el río Samantha en Hidalgo. El segundo grupo está conformado por los organismos que se encuentran en el sureste del país, desde la cuenca del río Nautla en Veracruz hasta Guatemala, Belice y norte de Honduras. Los peces cola de espada del norte y sur son de origen monofilético y comparten la presencia de este ornamento (Basolo, 1996).

Se han planteado diferentes hipótesis para explicar la historia evolutiva del género *Xiphophorus* con base a la espada; estas propuestas se basan en datos morfológicos, conductuales, bioquímicos y genéticos. Rosen (1979) propone una hipótesis basada en datos bioquímicos, genéticos y morfológicos junto con consideraciones de tipo biogeográfico. Esta hipótesis relaciona a *Xiphophorus* con su grupo hermano *Priapela* el cual incluye 5 especies descritas, todas ellas sin espada. Esta hipótesis señala distintos puntos fundamentales: El género *Xiphophorus* tuvo su origen a partir de peces sin espada, la cual propone tiene un origen monofilético. Los componentes que constituyen la espada surgen progresivamente a lo largo de su historia evolutiva, alcanzando su máxima extensión relativamente tarde en términos evolutivos. La ausencia de la espada es un carácter ancestral mientras que la espada es un carácter novedoso del grupo (Fig. 2a).

Otra hipótesis es la propuesta por Haas (1993), que se construyó basándose en caracteres de tipo tanto morfológico como conductual (cortejo). Esta

hipótesis indica, al igual que la antes mencionada, que la espada surge después de la divergencia entre los "platis" y los peces con espada, lo que sugiere que la presencia de la espada es un carácter compuesto derivado. Esta hipótesis a diferencia de la anterior agrupa ciertas especies de manera distinta. *X. maculatus* la ubica filogenéticamente en la base, *X. xiphidium* y *X. andersi* que no presentan espadas constituyen una rama secundaria que tuvo su origen entre los platis y los peces con espada (Fig. 2b).

Existe una tercera hipótesis propuesta por Meyer *et al.*, 1994. Esta sugiere una visión distinta acerca del carácter, sugiriendo que la espada es un carácter ancestral el cual ha surgido varias veces a lo largo de la historia filogenética. La espada se ha perdido una sola vez en la historia filogenética donde surgen las 9 especies de platis. Sin embargo, esta hipótesis presenta una gran diferencia respecto a las dos hipótesis antes mencionadas. Por un lado la espada está representada por una sola protuberancia de la aleta caudal sin presentar la expresión de los demás caracteres accesorios; por otro lado, esta hipótesis se basan en análisis a partir de secuencias parciales de tres genes (Fig. 2c). No obstante. Para la mayoría de los trabajos realizados una sola protuberancia sin la expresión de los caracteres accesorios no representa una espada como tal (Basolo, 1996).

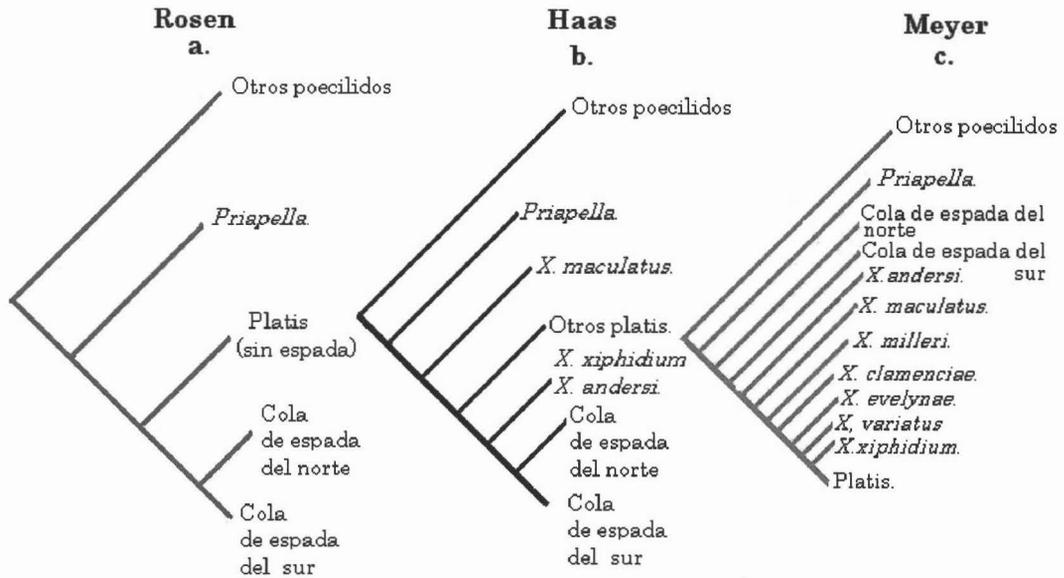


Fig. 2.- Hipótesis sobre la historia evolutiva del género *Xiphophorus*. (a) Rosen, 1979; (b) Haas, 1993; (c) Meyer *et al.*, 1994.

La reconstrucción en la historia evolutiva del género *Xiphophorus* muestra que la espada es un carácter derivado, donde la carencia de la espada es un estado ancestral (Raucherberg *et al.*, 1990; Basolo, 1990a; 1995a). El modelo de "Sesgos preexistente" puede explicar la evolución de la preferencia de las hembras del género por la espada. Este modelo indica que la preferencia sexual surgió previamente al origen del carácter, es decir el carácter pudo surgir y verse favorecido por algún sesgo que previamente estaba ya establecido (Basolo, 1995b).

#### COSTOS DE LOS ORNAMENTOS.

La presencia de un carácter sexual muy desarrollado puede representar costos en términos de adecuación en cuanto a su sobrevivencia. El portar un ornamento puede reducir la disponibilidad de energía para otras actividades tales como la búsqueda y captura del alimento, defensa territorial,

crecimiento entre otras. Dado que tanto el desarrollo como el mantenimiento del ornamento pueden ser metabólicamente costosos para el organismo que lo porta. Basolo (1998), observó cómo en condiciones desfavorables de alimento los machos del género *X. helleri* designan una mayor cantidad de energía para el desarrollo de la estructura que incluso para el desarrollo corporal, maximizando así su éxito reproductivo y acelerando el desarrollo de la espada, en comparación con el desarrollo corporal.

Portar un ornamento muy desarrollado, también puede ser desventajoso en cuanto a que la estructura muy desarrollada hace al individuo más evidente ante sus depredadores. En particular, en los machos del género *Xiphophorus* se ha observado que al portar una estructura tan colorida, éstos son más fácilmente detectados por sus depredadores naturales (Rosenthal *et al.*, 2001).

Por otro lado, también es factible pensar que los ornamentos que se presentan en algunos organismos debido a su gran tamaño podrían afectar aspectos relacionados con la locomoción. Por ejemplo la golondrina es un organismo que se utiliza comúnmente para demostrar la selección sexual ya que las hembras prefieren a los machos con alas más elongadas. En este tipo de organismo se ha encontrado que la extensión que presentan los machos en las plumas de la parte posterior de la cola afectan sus actividades de forrajeo. Los machos que presentaban una cola más larga cazan presas más pequeñas a diferencia de aquellas que presentan una cola de menor tamaño (Katherine y Evans, 2000). Al igual que estas aves, es viable pensar que la estructura en forma de espada que presentan los machos del género *Xiphophorus* afecte la locomoción, repercutiendo así en todas las

actividades que dependen de su desplazamiento (búsqueda de alimento, pareja, cortejo, escape ante sus depredadores, etc.). Kruesi (2004) encontró que la espada presente en machos de la especie *X. montezumae* representa una desventaja en cuanto al desempeño de nado (velocidad crítica máxima). Por otra parte, Basolo y Alcaraz (2003) demostraron que el consumo de oxígeno durante nado rutinario y de cortejo fue mayor para los organismos que presentaron el ornamento, en comparación con los organismos que no la presentaban. Es posible pensar que el decremento en cuanto al desempeño de nado y el aumento en el consumo de oxígeno se atribuyan a que la resistencia al avance se incremente con la presencia del ornamento.

## **ANTECEDENTES.**

### **ARRASTRE.**

El arrastre se puede entender como la fuerza de resistencia que actúa sobre cualquier cuerpo en movimiento. La resistencia al avance se compone de tres partes. El arrastre de fricción: este tipo de magnitud se origina por la fricción que existe entre el cuerpo y el medio circundante. El arrastre de presión: se atribuye a los cambios de presión en el fluido y son ocasionados por turbulencias o remolinos. Estas dos partes están altamente asociadas con la configuración física del pez o forma hidrodinámica. Por último el arrastre inducido: el cual es originado por todos los movimientos ondulatorios y laterales asociados con las aletas y el cuerpo (Gero, 1952).

El arrastre es una fuerza física compleja, tanto para su estimación como para su comprensión; en él participan elementos esenciales como la velocidad y dimensiones del cuerpo (hidrodinámica del cuerpo; Randall *et al.*, 1997).

actividades que dependen de su desplazamiento (búsqueda de alimento, pareja, cortejo, escape ante sus depredadores, etc.). Kruesi (2004) encontró que la espada presente en machos de la especie *X. montezumae* representa una desventaja en cuanto al desempeño de nado (velocidad crítica máxima). Por otra parte, Basolo y Alcaraz (2003) demostraron que el consumo de oxígeno durante nado rutinario y de cortejo fue mayor para los organismos que presentaron el ornamento, en comparación con los organismos que no la presentaban. Es posible pensar que el decremento en cuanto al desempeño de nado y el aumento en el consumo de oxígeno se atribuyan a que la resistencia al avance se incremente con la presencia del ornamento.

## **ANTECEDENTES.**

### **ARRASTRE.**

El arrastre se puede entender como la fuerza de resistencia que actúa sobre cualquier cuerpo en movimiento. La resistencia al avance se compone de tres partes. El arrastre de fricción: este tipo de magnitud se origina por la fricción que existe entre el cuerpo y el medio circundante. El arrastre de presión: se atribuye a los cambios de presión en el fluido y son ocasionados por turbulencias o remolinos. Estas dos partes están altamente asociadas con la configuración física del pez o forma hidrodinámica. Por último el arrastre inducido: el cual es originado por todos los movimientos ondulatorios y laterales asociados con las aletas y el cuerpo (Gero, 1952).

El arrastre es una fuerza física compleja, tanto para su estimación como para su comprensión; en él participan elementos esenciales como la velocidad y dimensiones del cuerpo (hidrodinámica del cuerpo; Randall *et al.*, 1997).

En el arrastre también participan elementos puramente físicos del fluido (densidad, viscosidad, tipo de flujo que se origina alrededor del cuerpo), este último puede ser de tipo laminar o turbulento, ya sea en la región adyacente a la superficie del cuerpo que se conoce como "capa laminar" o fuera de ella. El tipo de flujo puede ser evaluado a partir de un número adimensional conocido como número de Reynolds (Gero, 1952; Webb, 1975; Sagnes *et al.*, 2000).

La presencia de un ornamento de gran tamaño en forma de espada en machos del género *Xiphophorus* podría modificar cualquiera de los elementos referentes a la forma física del cuerpo y el tipo de flujo originado alrededor de cuerpo. Sin embargo uno de los elementos que se incrementa de forma notoria con la presencia de la espada es la longitud total y área corporal. Para *X. montezumae* se reporta que como resultado de la presencia de la espada la longitud corporal se incrementa hasta un 51% y el área hasta un 37% (Kruesi, 2004). Por lo que es de esperarse que al incrementarse el área y la longitud se incrementará el arrastre.

El aumento en la resistencia al avance reduce la capacidad de nado de los organismos ya que al incrementar la resistencia necesitará un mayor aporte de energía metabólica para traducirse en movimiento. La espada representa ventajas para la reproducción y desventajas para la sobrevivencia. Es decir, la ventaja que le confiere al macho portar un ornamento tan llamativo e incrementan su potencial reproductivo, representa al mismo tiempo una desventaja en términos de sobrevivencia ya que la actividad locomotora será afectada al incrementarse el arrastre, disminuyendo así las habilidades de desplazamiento.

demostrar experimentalmente los costos que representan los ornamentos es de gran importancia ya que provee evidencia que apoyaría la "hipótesis de las desventajas" (handicap). Esta hipótesis sugiere que las hembras prefieren a los machos con un rasgo que podría disminuir sus oportunidades de sobrevivencia, pero que a pesar de ello han podido vencer todas las adversidades que le confiere portar el ornamento. Es decir, los caracteres sexuales secundarios actúan en forma de señales honesta indicando una mayor calidad de los individuos (Zahavi, 1975). Así, el demostrar experimentalmente los costos que representa el ornamento para los machos portadores brinda evidencias sobre la veracidad de información de los ornamentos y aspectos relacionados con la evolución de las preferencias sexuales (Grafen, 1990) siempre y cuando se relacionen los experimentos: Costos de ornamentos versus selección.

Aunque en la literatura señala que los ornamentos generan costos (Slater y Halliday, 1994; Kotiaho, 2000; Candolin, 1999), son escasos los trabajos donde se demuestran experimentalmente los costos asociados a estructuras tan llamativas (Kruesi, 2004; Basolo y Alcaraz, 2003). En este trabajo se pretende demostrar experimentalmente el costo que representa el ornamento en forma de espada en machos del género *Xiphophorus*, estimando el arrastre generado por la estructura.

Existen distintas propuestas para calcular el arrastre que genera un cuerpo en movimiento. El arrastre ha sido calculado a partir de la aceleración en caída libre y a partir de la desaceleración que adquieren algunos modelos u organismo al desplazarse de forma horizontal (Magnan y Stlaqui, 1929; Magnan, 1930; Richardson, 1936; Gero, 1952; Gray, 1957; Lang y Daybell,



Otra de las balanzas implementadas en túneles de agua fue la elaborada por Brett (1963). A diferencia de la balanza elaborada por Webb, la posición de pez era ajustada por medio de la tuerca de ajuste, localizada en la parte superior del sistema. Esta controlaba la elongación del resorte localizado en la parte central del sistema. La magnitud de la fuerza de arrastre se mostraba por la manecilla índice (Fig. 4).

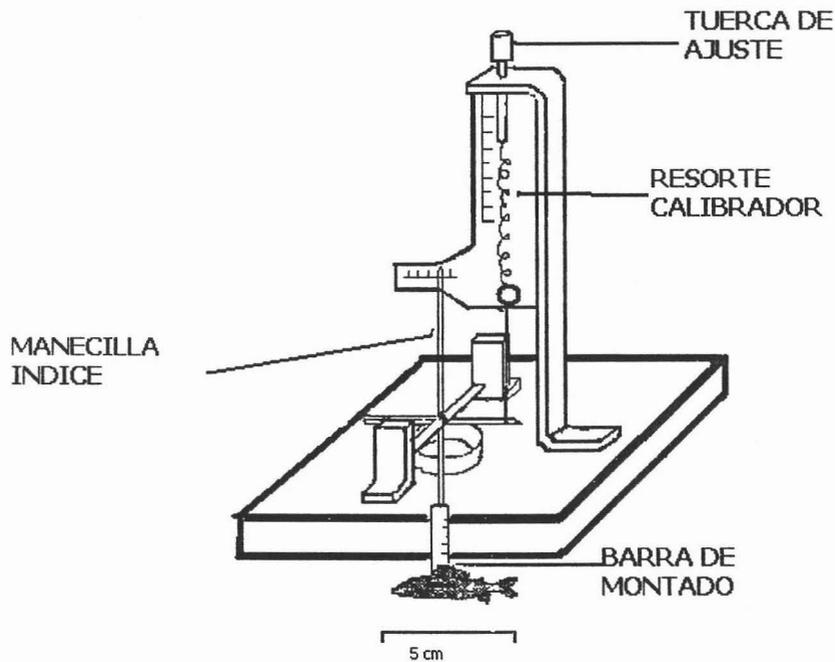


Fig. 4.- Balanza elaborada por Brett (1963) para cuantificar el arrastre

Dentro de los sistemas más modernos para estimar la fuerza de arrastre destaca el empleado por Sagnes *et al.*, (2000), quien además de utilizar un organismo sumergido en un flujo constante utiliza un transductor de señal y un sistema de cómputo (Fig 5). Aquí el arrastre es calculado a partir de la deformación de 4 soportes flexibles colocados conforme al puente de Wheatstone (Fig. 5).

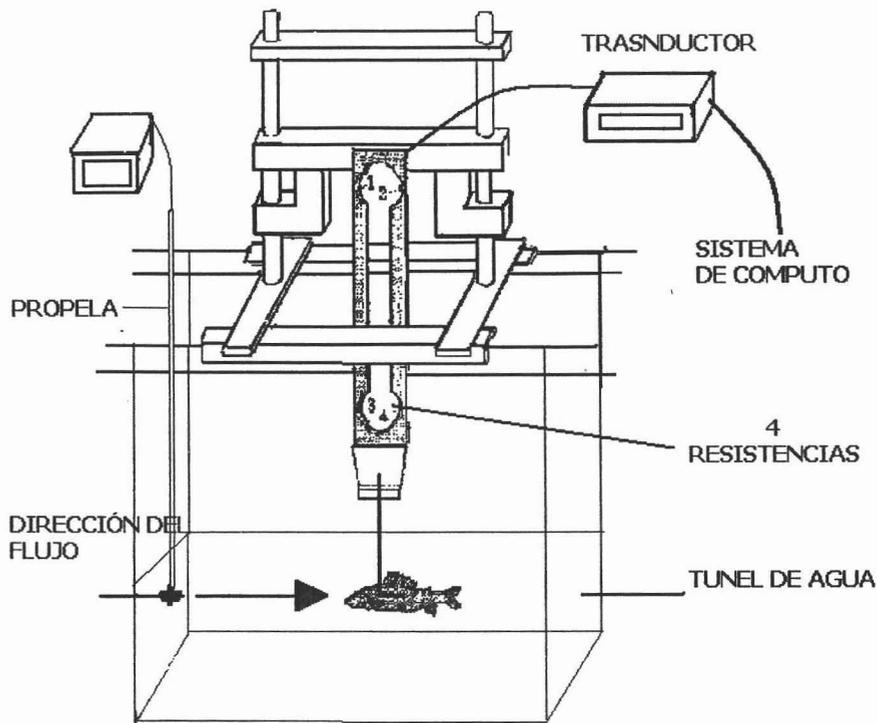


Fig. 5.- Dispositivo elaborado por Sagnes *et al.* (2000) para estimar el arrastre

Aunque existen distintos procedimientos para calcular el arrastre de peces, existen pocos trabajos enfocadas a cuantificar el arrastre originado por estructuras muy desarrolladas en peces. Para desarrollar este trabajo de investigación se diseñó un sistema capaz de evaluar el arrastre de un organismo sometido a distintas velocidades de la corriente.

## **OBJETIVO GENERAL**

Estimar el arrastre de la espada en machos del género *Xiphophorus* en distintas velocidades de la corriente.

## **OBJETIVOS PARTICULARES**

- a) Diseñar un sistema experimental que permita cuantificar el arrastre que sufre un organismo sometido a distintas velocidades de la corriente.
- b) Demostrar que el arrastre de espadas naturales y artificiales es similar en distintas velocidades de la corriente.
- c) Estimar el arrastre que sufren los machos con y sin la estructura en distintas velocidades de la corriente.
- d) Estimar el efecto de la talla de los peces y la velocidad de la corriente sobre el arrastre.
- e) Estimar el efecto de la longitud de la espada y la velocidad de la corriente sobre el arrastre que sufre un organismo sumergido.

## **HIPÓTESIS.**

\*La prolongación de los rayos inferiores en forma de espada incrementa el área corporal además de modificar la forma hidrodinámica general del organismo. Si el arrastre se incrementa con la superficie corporal y con una forma menos hidrodinámica del cuerpo, entonces es posible esperar que los machos portadores de la estructura de mayor dimensión y con una forma menos hidrodinámica presenten un mayor arrastre.

## MATERIAL Y METODOS.

### DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL.

Se diseñó y construyó un sistema capaz de estimar cuantitativamente la fuerza de arrastre que sufre un organismo en distintas velocidades de la corriente. El sistema se construyó con acrílico transparente, con excepción de la válvula de escape (Fig. 6). El sistema cuenta con un contenedor de agua en la parte superior "CS" de 45 cm de largo, 35 cm de ancho y 25 cm de altura. En la base del contenedor se encuentra un cilindro de mezcla "CM" de 13 cm de diámetro y 9 cm de altura, el cual recibe el agua de la bomba "B" y disminuye la turbulencia proveniente de la descarga de agua (Fig. 6).

Por debajo del contenedor conectado al cilindro de mezcla se colocó la cámara de trabajo "CT" de 45 cm de largo, con un área transversal de  $19.35 \text{ cm}^2$ . En la parte superior de la cámara de trabajo se colocó un sistema de tubos delgados "p" ordenados verticales con dimensiones de 0.05 cm de diámetro y 15 cm de largo, los cuales tienen la función de laminarizar el flujo de agua en su interior. En la parte posterior de la cámara de trabajo se construyó una compuerta "Com" de 4.5 cm de diámetro que permite la incorporación de los organismos al sistema experimental. El agua que sale de la cámara de trabajo es conducida al contenedor principal "CS" en la parte superior por una salida de 4 cm de diámetro. Esta salida conecta a un codo de acrílico de  $90^\circ$ , mismo que, a través de una manguera "m" de 4 cm de diámetro regresa la descarga de agua al contenedor superior.

El flujo de agua que circula dentro del sistema, es impulsado por una bomba "B" (Little Giant, modelo 5-MSP, 120 V, 60 Hz, 5.8 A). La velocidad de la

corriente es controlada por una válvula de escape "Ve", la cual está calibrada en ángulos de obturación. La válvula de escape permite desviar la descarga de agua proveniente de la bomba hacia el contenedor o dirigirla hacia el conducto que conecta con el cilindro de mezcla y posteriormente a la cámara de trabajo, teniendo así un control en la velocidad de la corriente en la cámara de trabajo, que va desde 0.216 - 0.387 m/s.

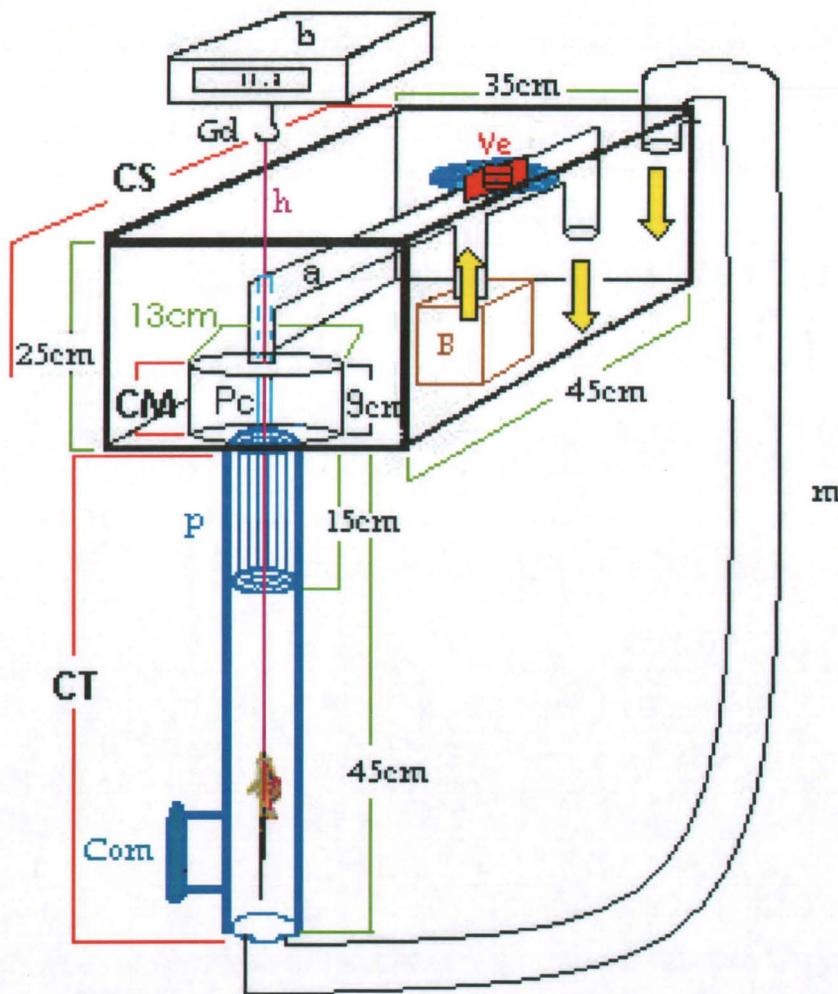


Fig. 6.- Esquema del dispositivo para estimar el arrastre en distintas velocidades de la corriente. Contenedor superior "CS", bomba "B", balanza "b", cámara de trabajo "CT", cilindro de mezcla "CM", compuerta "Com", válvula de escape "Ve", tubos delgados "p", gancho dinamómetro "Gd", hilo de nylon "h", popote central "Pc", tubo "a", manguera "m".

Adicionalmente, el sistema cuenta con una balanza de plato "b", de marca SCOUT II. OHAUS con capacidad de 200 X 0.01 g, con una desviación de sensibilidad de  $\pm 0.005$  (g) y una linealidad de  $\pm 0.01$  (g). La balanza esta colocada en la parte superior del sistema. La balanza cuenta con un dispositivo de pesado en forma de gancho "Gd" en la parte inferior que le permite funcionar como dinamómetro. Del gancho parte un hilo de nylon "h" de 0.9 mm de diámetro que se dirige al interior del cilindro de mezcla por medio de un orificio de 1.25mm de diámetro pasando por un popote central "pc" que se encuentra en su interior, el cual se encuentra adherido al techo del tubo "a" para evitar fuga de agua por le orificio. El hilo de nylon "h" continua por la parte media del conjunto de tubos delgados "p" colocados en la parte superior de la cámara de trabajo, terminando en la parte media de este donde es colocado al organismo previamente preparado.

#### ESPECÍMENES.

Para poder estimar el arrastre generado por la espada de machos del género *Xiphophorus* en distintas velocidades de la corriente se optó por utilizar organismos de la especie *X. helleri* debido a que presentan una aleta caudal en forma de espada. Se utilizó un total de 7 machos, los cuales presentan una longitud total que varió entre 5.8 y 9.2 cm sin considerar la espada y una longitud total incluyendo la espada natural entre 7.6 y 11.6 cm. El área corporal varió entre 9.9 - 16.0 cm<sup>2</sup> de la cual no se considero el área de la aleta dorsal, mientras que las aletas pectorales al estar adheridas al cuerpo no son consideradas. La extensión de la espada natural de los machos utilizados varió entre 1.7 - 4.3 cm.

## PREPARACIÓN DE LOS ORGANISMOS.

Los machos utilizados fueron sacrificados utilizando una solución anestésica de MS222 (Etil 3 Aminobenzoato Metanosulfanato) a una concentración lo suficientemente fuerte para matar al organismo.

Las branquias y las aletas dorsales fueron adheridas al cuerpo con pegamento de marca Kòla Loca, cuidando de no dejar residuos que pudieran modificar el arrastre. Posteriormente cada uno de los organismos fue barnizado con esmalte, para evitar que hubiera un transporte de agua al interior del cuerpo y realizar las pruebas en organismos libres de mucosa, dado que la presencia de mucus como el volumen del cuerpo modifica el arrastre en cuerpos sumergidos (Pettersson y Bronmark, 1999; Bernadsky *et al.*, 1993). Se colocó una sola capa de esmalte sobre la superficie del organismo con el objeto de no alterar la forma y espesor general del organismo.

Para evitar la flotabilidad y la interferencia de los posibles grados de rigidez del cuerpo de los organismos experimentales se les introdujo 3 varillas delgadas de cobre de 0.8 mm de diámetro a través de la boca hacia la parte final provocando una flotabilidad negativa. Después de colocar las varillas de cobre y pegar las aletas dorsales al cuerpo, se fijó el hilo de nylon a la boca del organismo, al mismo tiempo de sellarla con pegamento (Kola Loca). Una vez preparados los organismos permanecieron 25 minutos a temperatura ambiente para asegurarse que tanto el barniz como el pegamento seicara.

Por otra parte se llevó acabo la construcción de espadas artificiales, las cuales serian colocadas a cada uno de los sujetos experimentales en las distintas pruebas. Las espadas artificiales fueron elaboradas con plástico de acetato. Se seleccionó este material debido a que presenta características similares a las espadas naturales que presentan los machos de esta especie, tales como su grosor y flexibilidad. Para su fijación se utilizó pegamento (Kola Loca) y fueron colocadas sobre la base de la aleta caudal.

### VALORES MERÍSTICOS.

El registro de los valores merísticos de los peces se realizó en una superficie lisa, con el organismo previamente sacrificado. Las medidas se tomaron con ayuda de un Vernier digital (EC). Posteriormente, los peces se fotografiaron con una cámara digital (Canon, modelo ZR70), siempre utilizando una medida como referencia (regla graduada). Las fotografías se visualizaron en la computadora, los machos se midieron con ayuda del analizador de imágenes "Image J" el cual se encuentra disponible en Internet (para Windows). El programa Image J permitió estimar tanto el área corporal, como la longitud de cada organismo (Tabla 1).

Los valores merísticos se describen a continuación (Fig. 7).

1.-LT. Longitud total, comprende la longitud del pez excluyendo la espada, desde el extremo anterior que comienza con la boca hasta la parte posterior donde finaliza el borde de la aleta caudal.

2.-LTE. Longitud total con extensión de espada. Comprende la longitud del pez incluyendo la extensión de la espada, desde el extremo anterior que

comienza con la boca hasta el extremo posterior donde finaliza la extensión de la espada.

3.- **LS**. Longitud estándar. Distancia desde el extremo anterior del rostro hasta el centro de la línea de nacimiento de la aleta caudal.

4.- **EE**. Extensión espada. Comprende únicamente la longitud de la espada, a partir del borde final de la aleta caudal (en su parte inferior) hasta el extremo posterior de la espada (LTE-LT).

5.- **AC**. Área corporal. Es la superficie del cuerpo del pez excluyendo el área de las aletas dorsales (por ambos lados).

6.- **D**. Diámetro máximo (altura). Distancia entre el borde inferior y el borde superior

7.- **g**. Grosor. Parte más gruesa del cuerpo del organismo.

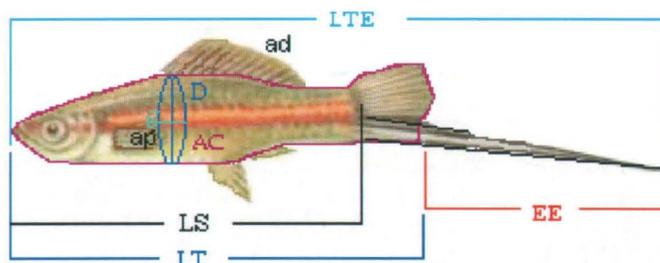


Fig 7. Medidas morfométricas que describen la talla y dimensiones de la espada de los organismos. Las líneas superiores e inferiores muestran los límites de la longitud total (LT) sin espada y la longitud total con extensión de espada (LTE), así como la longitud estándar (LS). El contorno morado muestra el área del cuerpo por ambos lados (AC) sin tomar en cuenta la aleta dorsal (ad). Las aletas pectorales (ap) fueron adheridas al cuerpo por lo que no son consideradas.

Tabla 1.- Valores merísticos de los machos experimentales. LT: Longitud total; LTE: Longitud total con extensión de espada; LS, Longitud estándar, EE: Extensión espada; D. Diámetro máximo, g. Grueso, AC: Área corporal por ambos lados.

Macho No.	LT (m)	LTE (m)	LS (m)	EE (m)	D (m)	g (m)	AC (m <sup>2</sup> )
1	0.058	0.076	0.057	0.017	0.011	0.00636	---
2	0.060	0.078	0.048	0.017	0.014	0.00858	0.108
3	0.061	0.092	0.048	0.031	0.012	0.00677	0.106
4	0.066	0.097	0.052	0.030	0.014	0.00860	0.153
5	0.068	0.078	0.055	0.009	0.016	0.00868	0.161
6	0.069	0.109	0.054	0.040	0.013	0.00754	---
7	0.074	0.092	0.057	0.018	0.022	0.00600	---

## PRUEBAS PREVIAS A LA MEDICIÓN DE ARRASTRE.

### 1.- ESTANDARIZACIÓN.

#### 1.1 VELOCIDAD DE CORRIENTE.

Se realizaron varias pruebas para establecer los grados de obturación de la válvula de escape que controla la velocidad de corriente en la cámara de trabajo. Las velocidades seleccionadas en este estudio fueron desde una velocidad mínima de 0.217 m/s hasta una velocidad máxima de 0.387 m/s. Así, las distintas velocidades fueron establecidas de acuerdo a los distintos grados de obturación de la válvula de escape (5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35° y 45°). Una vez establecido el grado de obturación de la válvula necesario para obtener la velocidad deseada en la cámara de

Tabla 1.- Valores merísticos de los machos experimentales. LT: Longitud total; LTE: Longitud total con extensión de espada; LS, Longitud estándar, EE: Extensión espada; D. Diámetro máximo, g. Grueso, AC: Área corporal por ambos lados.

Macho No.	LT (m)	LTE (m)	LS (m)	EE (m)	D (m)	g (m)	AC (m <sup>2</sup> )
1	0.058	0.076	0.057	0.017	0.011	0.00636	---
2	0.060	0.078	0.048	0.017	0.014	0.00858	0.108
3	0.061	0.092	0.048	0.031	0.012	0.00677	0.106
4	0.066	0.097	0.052	0.030	0.014	0.00860	0.153
5	0.068	0.078	0.055	0.009	0.016	0.00868	0.161
6	0.069	0.109	0.054	0.040	0.013	0.00754	---
7	0.074	0.092	0.057	0.018	0.022	0.00600	---

## PRUEBAS PREVIAS A LA MEDICIÓN DE ARRASTRE.

### 1.- ESTANDARIZACIÓN.

#### 1.1 VELOCIDAD DE CORRIENTE.

Se realizaron varias pruebas para establecer los grados de obturación de la válvula de escape que controla la velocidad de corriente en la cámara de trabajo. Las velocidades seleccionadas en este estudio fueron desde una velocidad mínima de 0.217 m/s hasta una velocidad máxima de 0.387 m/s. Así, las distintas velocidades fueron establecidas de acuerdo a los distintos grados de obturación de la válvula de escape (5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35° y 45°). Una vez establecido el grado de obturación de la válvula necesario para obtener la velocidad deseada en la cámara de

trabajo fue posible manipular las velocidades de la corriente de manera práctica durante los experimentos.

El flujo de agua en el sistema en los distintos grados de obturación de la válvula de escape fue estimado registrando el tiempo de aforo (tiempo total en el cual el recipiente de cuatro litros llegara a su capacidad máxima). Para evitar error de medición se estableció que una misma persona cuantificara el tiempo de aforo (utilizando un cronómetro) y manejase el grado de obturación de la válvula de escape. Se obtuvieron 18 registros de tiempo de aforo para cada grado de obturación de la válvula de los cuales se optó por registrar el valor promedio como una medida de tendencia central, así como el intervalo de variación. El tiempo de aforo se transformó a unidades de flujo ( $\text{cm}^3/\text{s}$ ). A partir de estos datos se calculó la velocidad en la cámara de trabajo utilizando la siguiente fórmula:

$$V = F / A$$

Donde "V" representa la velocidad en  $\text{cm}/\text{s}$ , y "F" representa el flujo en  $\text{cm}^3/\text{s}$  y "A" representa el área transversal de la cámara de trabajo ( $19.35 \text{ cm}^2$ ).

Las velocidades de corriente de agua dentro de la cámara de trabajo utilizadas en esta investigación fueron: 0.217, 0.236, 0.262, 0.294, 0.324, 0.345, 0.367 y 0.387  $\text{m}/\text{s}$ .

Para estimar la variación que pudiera existir en la velocidad de corriente se calcularon los coeficientes de variación de cada velocidad utilizando los resultados obtenidos generados de las 18 repeticiones.

## 1. 2 ARRASTRE.

Una vez construido el sistema de medición de arrastre fue necesario estimar si los valores de arrastre se mantenían constantes para un mismo espécimen (macho 3, Tabla 1), independientemente de la manipulación del sistema. Este consiste en el ajusté del grado de obturación y del encendido y apagado de la bomba; para esto fue necesario repetir el experimento en tres ocasiones (3 repeticiones).

El experimento consistió en colocar al macho número 3 dentro del sistema y exponerlo a las 8 velocidades de la corriente. Para cada velocidad se registraron los distintos valores mostrados por la balanza a lo largo de 1 minuto, obteniendo un valor promedio para cada velocidad. Al pasar de una velocidad de la corriente a otra, la bomba fue apagada (velocidad = 0), para posteriormente ajustar el siguiente grado de obturación, donde se encendía la bomba y se tomaban los siguientes valores de arrastre.

Para estimar la estabilidad del sistema después del encendido, apagado de la bomba y manipulación de los grados de obturación, se realizó un análisis de Covarianza, comparando los valores tanto de la pendiente como la ordenada al origen de las rectas, las cuales describen el arrastre en función de la velocidad de las 3 repeticiones. Utilizando las tablas de F (Jerrold, 1999) nos permitió estimar si se presentaban diferencias significativas entre las tres repeticiones.

## FASE EXPERIMENTAL.

### 1.-FASE EXPERIMENTAL I.

#### 1.1. ARRASTRE CON ESPADA NATURAL Y ARTIFICIAL.

En esta fase experimental se comparó el arrastre originado por un mismo organismo con una espada natural y con una artificial, de dimensiones similares en las 8 velocidades de la corriente. El organismo utilizado en esta fase experimental corresponde al macho número 7 (Tabla 1). Inicialmente se realizó la medición de arrastre en el macho con una espada real. Posteriormente, la espada fue cortada a la altura del borde distal de la aleta caudal con ayuda de un bisturí. La espada fue retirada y sustituida por una espada artificial de dimensión similar a la natural. La espada artificial que se construyó y colocó en el sujeto experimental fue elaborada con plástico de acetato. Se seleccionó este material debido a que presenta características similares a las espadas naturales que presentan los machos de esta especie, tales como su grosor y flexibilidad. Para su fijación se utilizó pegamento (Kola Loca) y fueron colocadas sobre la base de la aleta caudal.

Para cada velocidad se tomaron 3 registros, en cada registro se tomaron los distintos valores de arrastre que mostraba la balanza a lo largo de un minuto. Para pasar a un segundo y tercer registro la bomba fue apagada (V = 0) y encendida de nuevo.

Los valores de arrastre que se presentan en este trabajo representan el valor promedio de los 3 registros de cada velocidad, inicialmente cuando el

organismo presenta una espada natural y posteriormente cuando el organismo presenta una espada artificial.

La relación entre el arrastre y la velocidad de corriente originado por ambas espadas se comparó realizando un análisis de Covarianza, comparando así los valores tanto de la pendiente como la ordenada al origen de las rectas, las cuales describen el arrastre en función de la velocidad para un mismo organismo con una espada natural y con una espada artificial. Utilizando una tabla de "t" (Jerrold, 1999) nos permitió estimar si se presentaban diferencias significativas en el arrastre originado por ambas espadas.

## 1. 2. ARRASTRE CON Y SIN ESPADA.

En esta fase experimental se estimó el arrastre de cada uno de los organismos de distintas longitudes con y sin espada en 8 velocidades de la corriente. Los machos utilizados en este experimento corresponden a los machos 1, 2, 3, 4 y 5 (Tabla 1).

Para medir el arrastre de cada uno de los machos sin la estructura, la espada natural fue retirada, realizando una disección en el extremo distal de la aleta caudal, por otra parte para estimar el arrastre que sufría el organismo en presencia de la estructura, se elaboró una espada artificial con el mismo material que la prueba anterior (plástico de acetato). La longitud de las espadas artificiales correspondió a un 100% respecto a su

longitud total LT (de la boca al límite de la aleta caudal). Es decir la longitud de la espada era la misma que la longitud del cuerpo.

Para cada velocidad se tomaron los distintos valores de arrastre mostrados por la balanza a lo largo de 1 minuto, al término de este periodo la bomba se apagaba ( $V = 0$ ) y se encendía para proceder a un segundo, y un tercer registro con la misma duración. Los valores de arrastre que se presentan en este trabajo representan los valores promedio de los 3 registros para cada velocidad.

Para comparar el arrastre con y sin espada de cada macho en función de la velocidad de la corriente, se llevó acabo un análisis de Covarianza, comparando la pendiente y la ordenada al origen de ambas rectas, utilizando una tabla de "t" (Jerrold, 1999).

## 2.-FASE EXPERIMENTAL II.

### 2. 1. EFECTO DE LA TALLA Y LA VELOCIDAD SOBRE EL ARRASTRE.

A partir de los valores de arrastre obtenidos por los machos 1, 2, 3, y 4 en la prueba anterior (arrastre con y sin espada, Tabla 8) se llevo acabó un análisis de regresión múltiple utilizando el paquete estadístico "Statistics 6.0".

Para la regresión múltiple, la longitud del organismo como la velocidad se establecieron como variables independientes, mientras que el arrastre se estableció como variable de respuesta o dependiente. Posteriormente se generó una ecuación polinomial a partir de la cual se generó una superficie

de respuesta que permitió expresar los datos obtenidos de manera gráfica. Los valores de arrastre con los cuales trabajó el modelo de regresión múltiple se muestran en la sección de resultados, tanto para los organismos con espada y sin espada.

## 2. 2. EFECTO DE LA LONGITUD DE LA ESPADA Y LA VELOCIDAD DE LA CORRIENTE SOBRE EL ARRASTRE.

En esta fase experimental se estimó el arrastre generado por un mismo espécimen, el cual corresponde al macho número 6 (Tabla 1), con espadas de distinta longitud a diferentes velocidades de corriente. El corte se realizó en el extremo distal de la aleta caudal, es decir se eliminó únicamente la extensión de la espada. Las espadas artificiales se colocaron sobre la base de aleta caudal, los diferentes largos de las espadas artificiales son 1.7, 3.4, 5.1 y 6.9 cm, que corresponden a un 25%, 50%, 75% y 100% de su longitud total (Fig. 8).

Se midió el arrastre en 3 velocidades de corriente (0.294, 0.345 y 0.387 m/s) en el mismo espécimen con las espadas de distinta longitud. Una vez medido el arrastre en cierta velocidad, la bomba se apagaba ( $V = 0$ ) y se procedía a medir en la siguiente velocidad encendiéndola de nuevo, esto se realizó hasta tener tres registros por cada velocidad. Los valores de arrastre que se registraron para cada velocidad fueron los diferentes valores que mostró la balanza a lo largo de 1 minuto, utilizando el valor promedio como una medida de tendencia central. La medición del arrastre en las 3 velocidades se realizó primeramente en la ausencia del ornamento

para posteriormente añadirles las espadas de distinta longitud de forma progresiva.

Se realizó un análisis de regresión múltiple con los valores de arrastre obtenidos con el sistema (ver sección de resultados la Tabla 11) donde la longitud total del organismo con espada (LTE) y la velocidad se establecieron como variables independientes y el arrastre como variable dependiente. Posteriormente, se generó una ecuación polinomial para los datos a partir de la cual se generó una superficie de respuesta que permitió expresar el comportamiento de los datos de manera gráfica, de igual manera que el análisis anterior se utilizó un paquete de estadística básica "Statistics".

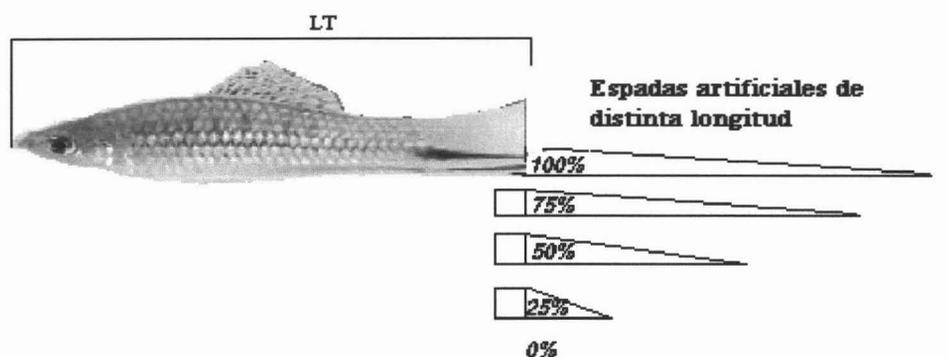


Fig. 8.- Especimen con espadas artificiales de dimensión correspondiente a 25%,50%, 75% y 100% de su longitud total (LT).

Los valores de arrastre con los cuales trabajo el modelo de regresión múltiple en esta prueba se muestran en la sección de resultados.

# RESULTADOS

## 1.-ESTANDARIZACIÓN.

En este primer capítulo se describen los resultados que permitieron estandarizar de acuerdo a pruebas preliminares el arrastre en distintas velocidades de corriente. Por un lado, se establecieron pruebas para controlar la velocidad de la corriente dentro de la cámara de trabajo, y por otro lado para estandarizar el registro de datos de arrastre.

### 1.1 VELOCIDAD DE LA CORRIENTE.

Las diferentes velocidades de la corriente se incrementaron de manera lineal de acuerdo al grado de obturación de la válvula de escape (5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35° y 45°) obteniéndose una velocidad mínima de 0.217 m/s a los 5° y una máxima de 0.387 m/s a los 45° (Fig. 9).

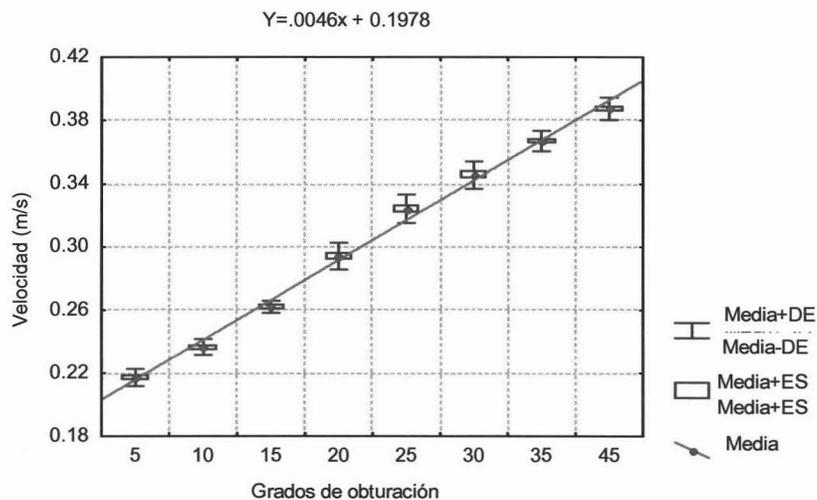


Fig. 9.- Velocidad de corriente respecto al grado de obturación de la válvula de escape del sistema experimental. Para cada grado de obturación se presenta la media con la desviación estándar (DE) y el error estándar (ES).

Los coeficientes de variación (CV) de las distintas velocidades para cada grado de obturación mostraron valores por debajo de un 3 % en todos los casos (Tabla 3).

Tabla 3. - Velocidades de la corriente usadas en el experimento y su relación con el grado de obturación de la válvula de escape. Se presentan valores estadísticos de tendencia central y variación de los valores de la velocidad.

Grado de obturación	N	Media. (m/s)	Mediana (m/s)	Valores Mínimos (m/s)	Valores Máximos (m/s)	Desviación estándar	Varianza	CV %
5	18	0.217	0.216	0.208	0.231	0.005	2.84E-05	2.46
10	18	0.236	0.235	0.226	0.245	0.005	2.53E-05	2.13
15	18	0.262	0.262	0.255	0.270	0.004	1.44E-05	1.45
20	18	0.294	0.292	0.282	0.306	0.009	7.34E-05	2.92
25	18	0.324	0.323	0.307	0.341	0.009	8.21E-05	2.80
30	18	0.345	0.345	0.328	0.359	0.009	7.71E-05	2.54
35	18	0.367	0.366	0.355	0.378	0.006	4.03E-05	1.73
45	18	0.387	0.388	0.369	0.397	0.007	5.12E-05	1.85

## 1. 2 ARRASTRE.

Los resultados muestran que los registros de arrastre que se obtuvieron del macho 3 se mantienen estables independientemente de la velocidad y de la manipulación del sistema (incluyendo el encendido y apagado de la bomba). Las pendientes y las ordenadas al origen, que describen el arrastre en función de la velocidad de las 3 repeticiones, no presentan diferencias significativas ( $p > 0.05$ , Tabla 5, Fig. 10).

Tabla 5.- Comparaciones entre las pendientes y ordenadas al origen de los valores de arrastre de las tres repeticiones.

	Grados de libertad	P	t-cal	t-tablas(0.05)
Ordenada al origen	F(2, 80)	NS	-39.84	2.35
Pendiente	F(2, 78)	NS	0.85	2.35

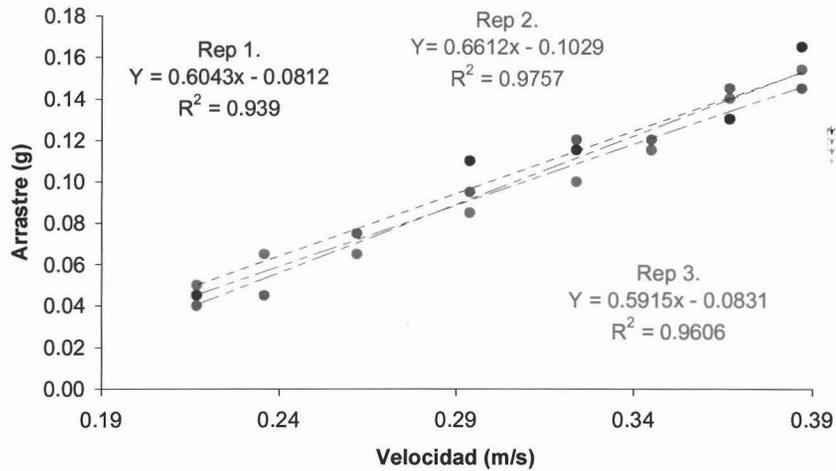


Fig. 10.- Arrastre obtenido a partir de las tres repeticiones utilizando a un mismo sujeto experimental con espada. Cada uno de los puntos representa el promedio de los distintos valores mostrados por la balanza a lo largo de 1 minuto en las distintas velocidades de la corriente.

## FASE EXPERIMENTAL.

### 1.- FASE EXPERIMENTAL I.

En esta primera fase experimental se describen los resultados que permitieron comparar el arrastre que sufre un organismo con una espada natural y una espada artificial de iguales dimensiones. Por otro lado, se muestra los resultados que permitieron comparar el arrastre en función de la velocidad de la corriente originado por machos con y sin la estructura.

#### 1. 1. ARRASTRE CON ESPADA NATURAL Y ARTIFICIAL.

En los experimentos diseñados para demostrar que el arrastre generado por peces con espadas naturales o artificiales es similar, se comparó el arrastre originado por un mismo organismo (macho 7, Tabla 1) con una espada natural y con una artificial, de dimensiones similares. Encontramos que las pendientes y ordenadas al origen que describen el arrastre en función de la velocidad de

la corriente del espécimen son similares entre sí ( $p > 0.05$ ; Tabla 6). Es decir, en el intervalo de velocidades utilizadas en este estudio, las espadas naturales y artificiales generan el mismo arrastre (Fig. 11).

Tabla 6.- Comparaciones entre las pendientes y ordenadas al origen de los valores de arrastre que genera un mismo organismo con una espada natural y con una espada artificial de iguales dimensiones.

	Grados de libertad	P	$t_{-cal}$	$t_{-tablas(0.05)}$
Ordenada al origen	$t(11)$	NS	0.358	2.20
Pendiente	$t(10)$	NS	0.798	2.22

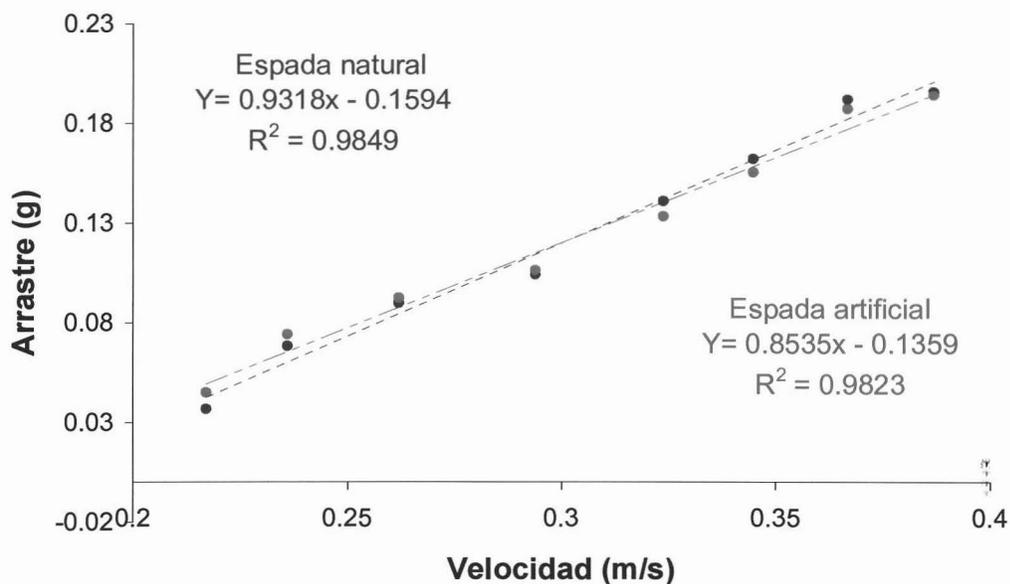


Fig. 11.-Arrastre generado por el macho número 8 con una espada natural y con una espada artificial de iguales dimensiones en distintas velocidades de la corriente. Cada uno de los puntos representa el valor promedio de los tres registros.

## 1. 2. ARRASTRE CON Y SIN ESPADA.

Al comparar las ordenadas al origen que describen el arrastre en función de la velocidad de la corriente de los machos 1, 2, 3, 4 y 5 (Tabla 1) con y sin espada, se halla que los valores son significativamente diferentes ( $p < 0.05$ , Tabla 7); a diferencia de las pendientes, las cuales son similares entre si ( $p > 0.05$ , Tabla 7). Por lo que la razón de cambio de los valores de arrastre respecto a la velocidad tiene un incremento proporcional en valores relativos, ya que las pendientes no mostraron diferencias significativas de acuerdo al análisis de covarianza.

Tabla 7. - Parámetros de la comparación de pendientes y ordenadas al origen que describen el arrastre en función de la velocidad de corriente de los machos con y sin la estructura, indicando como (NS) cuando no hay diferencias significativas mientras que con una (S) cuando existe diferencias significativas.

No Macho	LT (m)	Pendiente.			Ordenada		
		t-cal	t-tab(0.05,12)	p	t-cal	t-tab(0.05,13)	p
1	0.058	0.461	2.179	NS	3.292	2.160	S
2	0.060	1.065	2.179	NS	2.889	2.160	S
3	0.061	0.008	2.179	NS	3.383	2.160	S
4	0.066	0.600	2.179	NS	3.151	2.160	S
5	0.068	1.175	2.179	NS	3.270	2.160	S

En todos los casos el arrastre de los especímenes con espada fue mayor que sin ella; es decir, en el intervalo de velocidades utilizadas en este estudio, los peces con la espada generan más arrastre que sin ella (Fig. 12, 13).

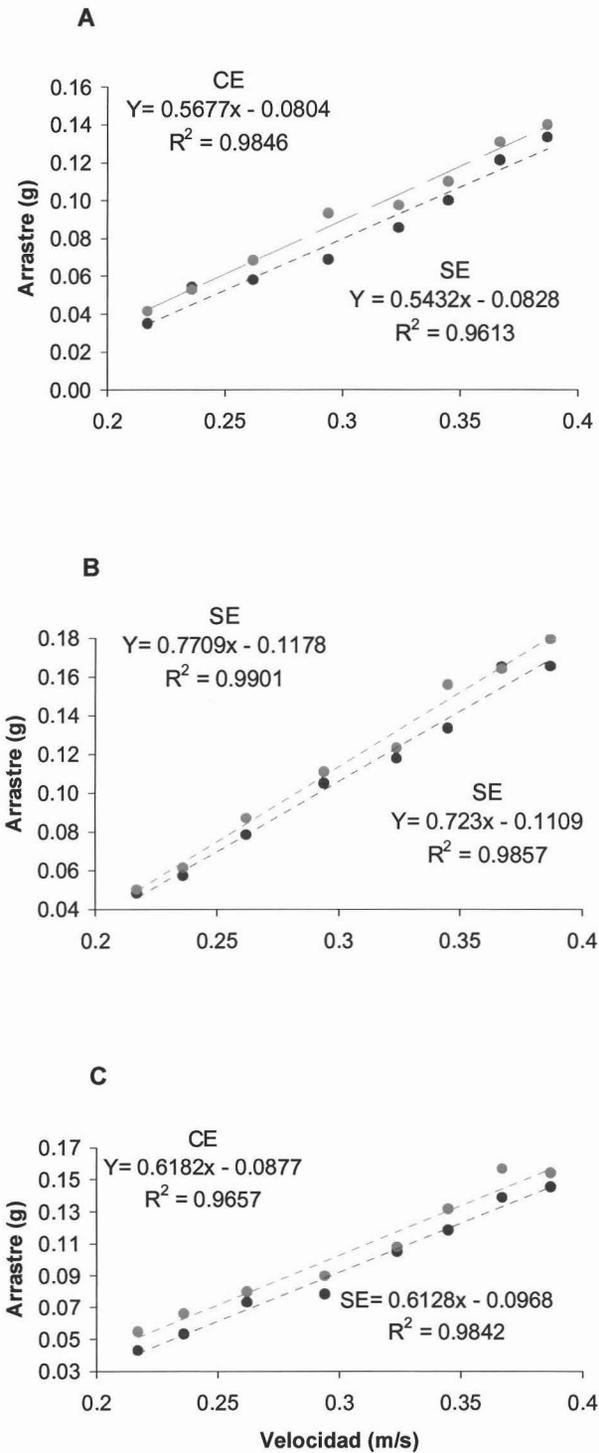


Fig. 12.- Arrastre generado por los machos 1 (A), 2 (B) y 3 (C) con y sin espada. En color rosa se muestra el arrastre que sufre el macho cuando presenta la espada (CE) y en azul cuando le fue retirada la estructura (SE). Cada punto representa el valor promedio de arrastre de los 3 registros para cada velocidad.

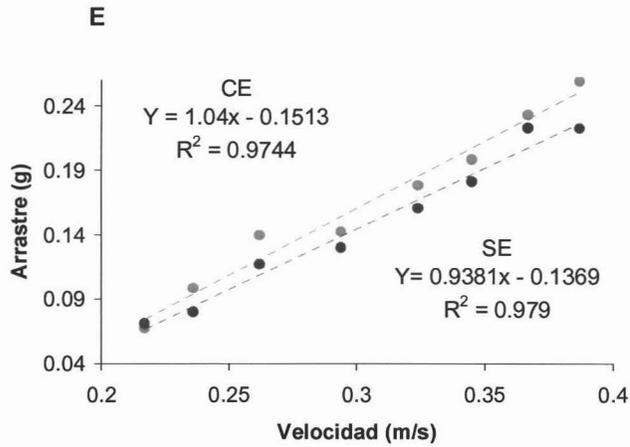
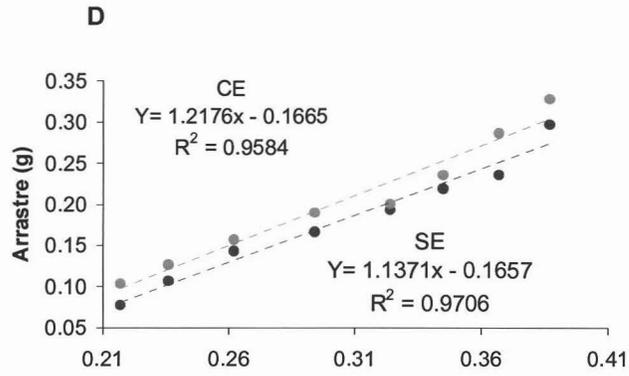


Fig. 13.- Arrastre generado por los machos 4 (D) y 5 (E) con y sin espada. En color rosa se muestra el arrastre que sufre el macho cuando presenta la espada (CE) y en azul cuando le fue retirada la estructura (SE). Cada punto representa el valor promedio de arrastre de los 3 registros para cada velocidad.

## 2.- FASE EXPERIMENTAL II.

En esta segunda fase experimental se exponen los resultados que permitieron analizar el arrastre en función de dos variables; la velocidad de la corriente y la longitud. Esta última se consideró de dos formas distintas, considerando la longitud del pez excluyendo la espada (LT) y la longitud del pez incluyendo la extensión de la espada (LTE).

### 2.1. - EFECTO DE LA TALLA Y LA VELOCIDAD SOBRE EL ARRASTRE.

La regresión múltiple elaborada a partir de los valores de arrastre obtenidos por los machos 1, 2, 3 y 4 (Tabla 8), reveló que los especímenes con espada (equivalente a 100% de su longitud total LT) la velocidad de corriente, como la talla de los organismos presentan un efecto significativo en el arrastre ( $p < 0.05$ ; Tabla 9). De acuerdo a los resultados obtenidos por el paquete estadístico "Statistics" la velocidad de la corriente representa una mayor contribución relativa sobre el arrastre en comparación con la talla del organismo con la extensión de la espada, pudiéndose observar en los valores del coeficiente de Beta (Tabla 9).

Asimismo, en los especímenes sin estructura (con la extensión de espada disectada) la regresión múltiple muestra que la velocidad de corriente, como la talla de los organismos, presentan un efecto significativo en el arrastre ( $p < 0.05$ ; Tabla 10). La velocidad de corriente también mostró una mayor contribución relativa sobre la fuerza de arrastre, en comparación con la talla del organismo (Coeficiente de Beta; Tabla 10).

Tabla 8.- Valores de arrastre obtenidos para los machos 1, 2, 3 y 4 con y sin espada en las distintas velocidades de la corriente ( $V_1, V_2, V_3 \dots V_8$ ). En color rojo se muestra el arrastre que sufre el macho cuando presenta la espada (CE) y en negro cuando le fue retirado la estructura (SE). Cada valor representa el valor promedio de arrastre de los 3 registros para cada velocidad; con una duración de un minuto cada registro.

		$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_7$	$V_8$
	<b>Macho</b>	<b>0.217</b>	<b>0.236</b>	<b>0.262</b>	<b>0.294</b>	<b>0.324</b>	<b>0.345</b>	<b>0.367</b>	<b>0.387</b>
CE	1	0.042	0.053	0.068	0.093	0.098	0.110	0.131	0.140
SE	1	0.035	0.054	0.058	0.069	0.086	0.100	0.121	0.133
CE	2	0.050	0.061	0.087	0.111	0.123	0.156	0.164	0.179
SE	2	0.048	0.057	0.079	0.105	0.118	0.133	0.165	0.166
CE	3	0.050	0.061	0.075	0.085	0.102	0.127	0.152	0.149
SE	3	0.038	0.048	0.068	0.073	0.100	0.113	0.134	0.141
CE	4	0.104	0.127	0.157	0.190	0.201	0.236	0.287	0.328
SE	4	0.078	0.107	0.143	0.166	0.193	0.219	0.236	0.297

Tabla 9. - Parámetros de la regresión múltiple del arrastre en función de la velocidad de corriente y la talla de los machos (longitud total con espada LTE).

R = 0.948, R <sup>2</sup> =0.900, R <sup>2</sup> Ajustada =0.893 F <sub>(2,29)</sub> = 129.95, p <= 0.001; ES = 0.087, Error de estimación =0.022						
	BETA	ES de BETA	B	ES de B	t(0.05,29)	p
Ordenada al origen			-1.045	0.087	-12.019	<0.001
Long Total incluyendo Espada(m) LTE	0.648	0.059	7.559	0.686	11.018	<0.001
Vel (m/s)	0.692	0.059	0.804	0.068	11.768	<0.001

Tabla 10.- Parámetros de la regresión múltiple del arrastre en función de la velocidad de corriente y la talla de los machos (longitud total sin espada, LT).

R = 0.951, R <sup>2</sup> =0.904, R <sup>2</sup> Ajustada =0.897 F <sub>(2,29)</sub> = 136.07 , p = p<0.001 ; ES = 0.077, Error de estimación = 0.020						
	BETA	ES de BETA	B	ES de B	t(0.05,29)	p
Ordenada al origen			-0.917	0.077	-11.831	<0.001
Long Total (m) LE	0.615	0.058	13.051	1.223	10.667	<0.001
Vel (m/s)	0.725	0.058	0.754	0.060	12.584	<0.001

Las ecuaciones polinomiales que describen el comportamiento del arrastre en función de la longitud total del organismo con y sin espada (LT, LTE) y la velocidad de la corriente son:

$$A = 6.51 - 98.82 \text{ LTE} - 5.32V + 372.23 \text{ LTE}^2 + 1.31 V^2 + 43.38 V \text{ LTE}.$$

$$A = 5.04 - 151.56 \text{ LT} - 4.71 V + 1124.86 \text{ LT}^2 + 1.10 V^2 + 78.11 V \text{ LT}.$$

Donde "A" representa el valor del arrastre (g), "V" es la velocidad de la corriente (m/s), "LTE" es la longitud total del espécimen con la estructura y "LT" es la longitud total del espécimen sin la estructura (m).

Las superficies de respuesta que muestran el comportamiento del arrastre en función de la velocidad y la talla para los machos (con espada y sin espada) revelan que el arrastre se incrementa respecto a la talla de los machos y la velocidad de corriente. Los valores máximos de arrastre se observan en los organismos de mayor talla y en los valores de velocidad más altos (0.387 m/s; Fig. 14, 15). En la figura 16 se presenta el arrastre únicamente de 3 organismos ( $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_4$ ) para destacar la tendencia y comportamiento de los datos, observando que los valores de arrastre son

similares entre los machos 1 y 2 respecto al macho 4 ya que presentan una mayor talla.

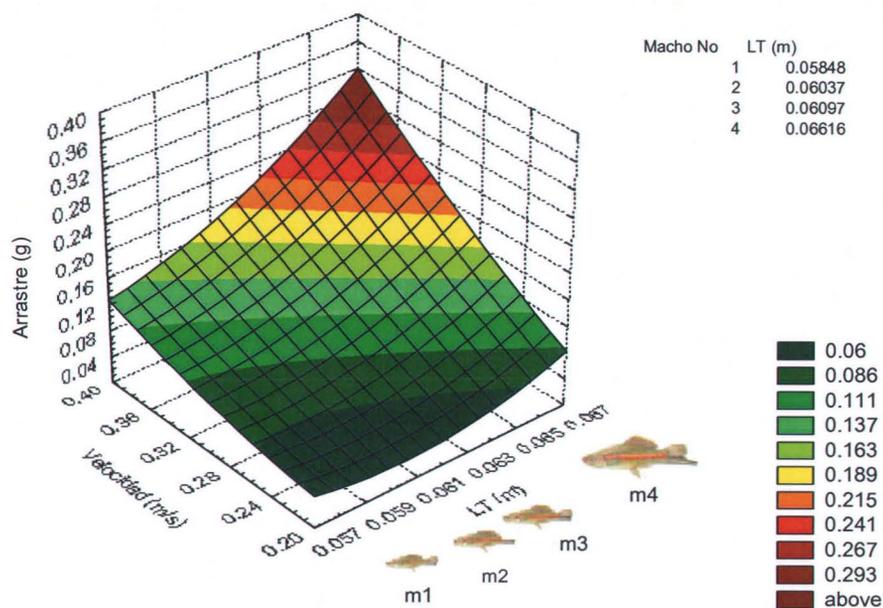


Fig. 14.-Superficie de respuesta que describe el arrastre respecto a la talla (longitud LT) y la velocidad de la corriente. Los valores correspondientes a las distintas tallas de los organismos sin espada se señalan en la figura como: Macho 1(m<sub>1</sub>), macho 2 (m<sub>2</sub>), macho 3 (m<sub>3</sub>), y macho 4 (m<sub>4</sub>).

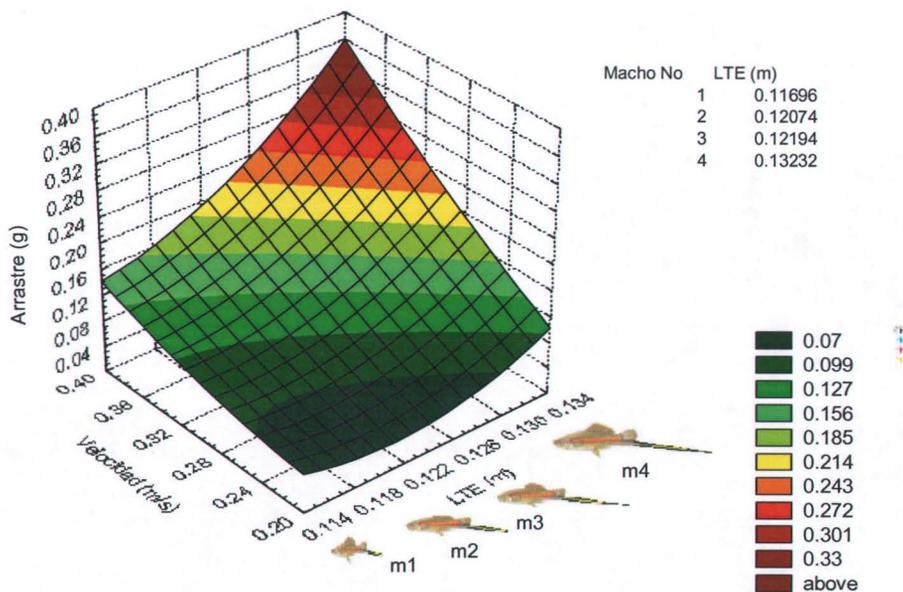


Fig. 15.-Superficie de respuesta que describe el arrastre respecto a la talla (longitud LTE) y la velocidad de la corriente. Los valores correspondientes a las distintas tallas de los organismos con espada se señalan en la figura como: macho 1(m<sub>1</sub>), macho 2 (m<sub>2</sub>), macho 3 (m<sub>3</sub>), etc.

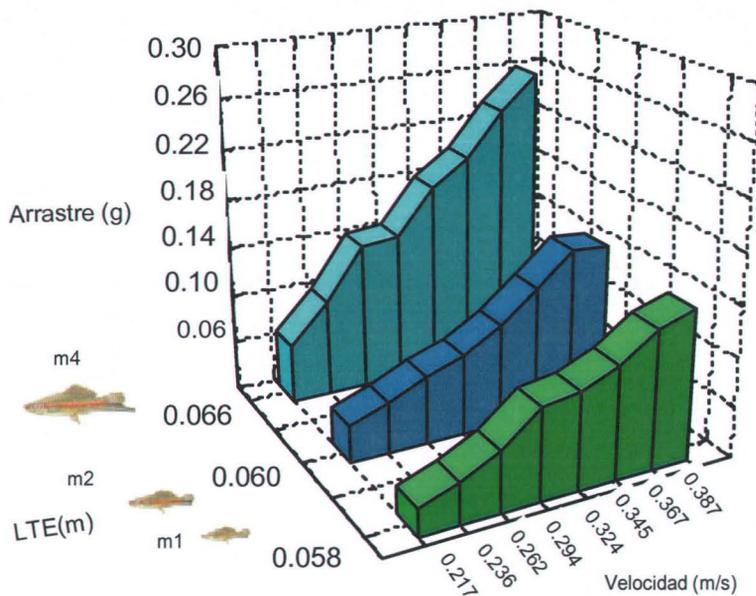


Fig. 16.- Arrastre generado por organismos sin espada en diferentes velocidades de la corriente. Se presenta datos de 3 organismos ( $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_4$ ) para destacar la tendencia y comportamiento de los datos.

## 2.2. EFECTO DE LA LONGITUD DE LA ESPADA Y LA VELOCIDAD DE LA CORRIENTE SOBRE EL ARRASTRE.

El arrastre que sufrió el macho número 6 con distintas longitudes de espada (equivalente a un 0, 25, 50, 75 y 100% de su longitud total LT) se muestran en la tabla número 11. La regresión múltiple muestra que tanto la velocidad de corriente, como la longitud total con espada presentan un efecto significativo en el arrastre ( $p < 0.05$ ; Tabla 12). En este caso dado que se utilizó el mismo espécimen, la variación de la longitud total depende únicamente del largo de la espada. De acuerdo a los resultados obtenidos por el paquete estadístico "Statistics 6.0", la velocidad de la corriente muestra mayor contribución sobre la fuerza de arrastre, en comparación

con la longitud total del organismo incluyendo la espada (LTE, coeficiente de Beta; Tabla 12).

Tabla 11.- Valores de arrastre obtenidos para el macho 6 con distintas longitudes de espada en tres velocidades de la corriente (V1,, V2 y V3). LTE representa la longitud total del macho incluyendo la espada. Cada valor de arrastre (g) representa el valor promedio de arrastre de los 3 registros para cada velocidad.

		V1 0.294 m/s	V2 0.345 m/s	V3 0.387 m/s
Macho	LTE (m)	Arrastre	Arrastre	Arrastre
6	0	0.087	0.132	0.154
6	0.017	0.110	0.151	0.149
6	0.034	0.115	0.145	0.183
6	0.051	0.118	0.155	0.176
6	0.069	0.142	0.191	0.223

Tabla 12. Parámetros de la regresión múltiple que describe el arrastre en función de la velocidad de corriente y la talla del macho 6 (longitud total incluyendo la espada, LTE).

R = 0.945, R<sup>2</sup>=0.893, R<sup>2</sup> Ajustada =0.875  
F<sub>(2,12)</sub> = 50.143, p = <0.001; ES = 0.010, Error de estimación =0.106

	BET A	ES de BETA	B	ES de B	t(0.05,12)	p
Ordenada al origen			-0.122	0.027	-4.453	<0.001
Long Total incluyendo Espada(m) LTE	0.577	0.094	0.684	0.112	6.113	<0.001
Vel (m/s)	0.749	0.094	0.570	0.072	7.932	<0.001

La ecuación polinomial que describe el comportamiento del arrastre en función de la talla del organismo incluyendo la espada (LTE) y la velocidad de corriente es:

$$A = 0.61 - 1.84 E + 4.24 V + 6.10 E^2 - 5.88 V^2 + 3.15 V LTE$$

Donde "A" representa el valor de arrastre (g), "V" es la velocidad de la corriente (m/s) y "LTE" es la longitud total del pez incluyendo la extensión de la espada (m).

La superficie de respuesta muestra que el arrastre se incrementa con el incremento en la longitud total del organismo como resultado de espadas artificiales de mayor longitud. Así mismo el arrastre se incrementa cuando los especímenes son expuestos a velocidades de la corriente mayores. Es decir, los valores máximos de arrastre se observan en presencia de una espada mas larga a la mayor velocidad de la corriente (Fig. 17, 18).

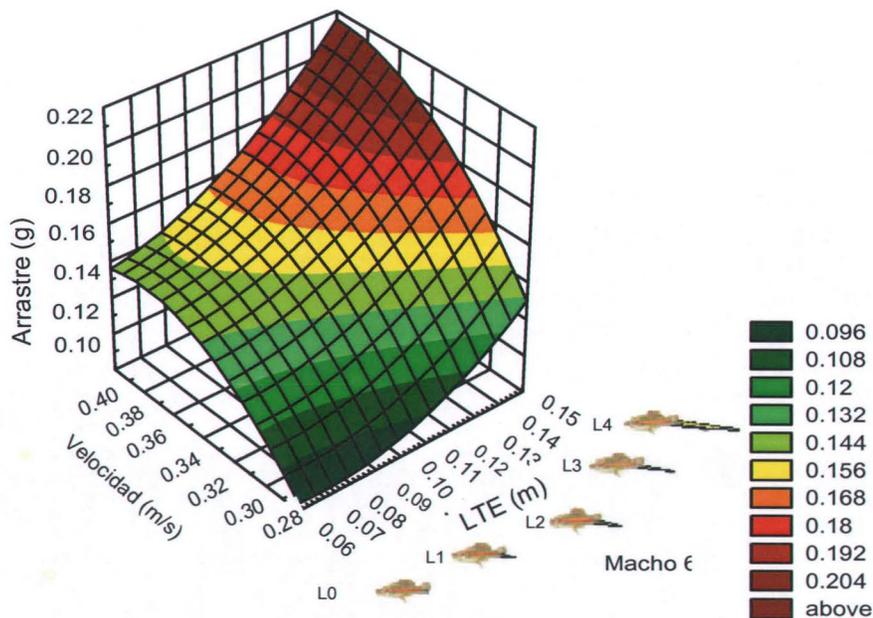


Fig. 17.- Superficie de respuesta que describe como se comporta el arrastre respecto a la longitud de la espada y a la velocidad de la corriente. Los valores correspondientes a la extensión de la espada se señalan en la figura como: sin espada (L0), 25% de extensión de espada (L1), 50% de extensión de espada (L2), 75% de extensión de espada (L3) y 100% de extensión de espada (L4).

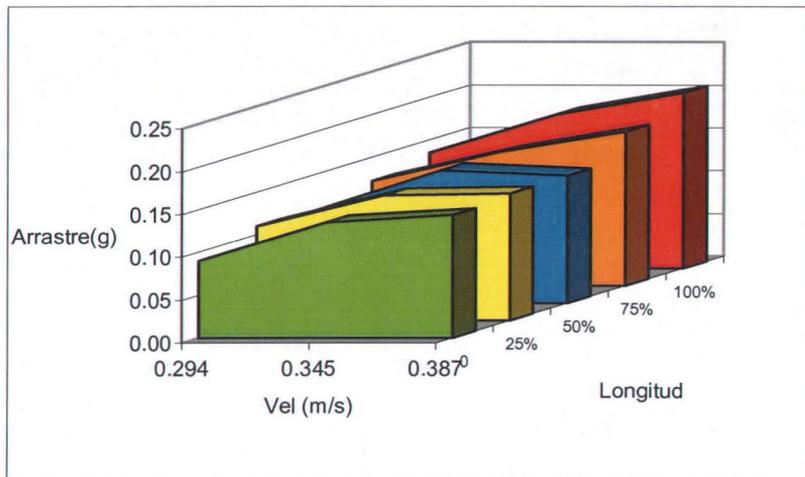


Fig. 18.-Arrastre generado por un organismo con distintas longitudes de espada en 3 velocidades de corriente. La longitud se expresa en porcentaje respecto a su longitud total (LT).

## DISCUSIÓN.

Sin lugar a duda la locomoción es una actividad de vital importancia para la adecuación de los organismos al medio. Los peces necesitan llevar acabo actividades tan básicas como la obtención de alimento, competencia por el alimento, y por pareja, dar persecución a sus presas, así como escapar ante sus depredadores. La fuerza que se denomina arrastre, sin duda, es un elemento que influye de manera considerable sobre todos los organismo que se mueven o desplazan sobre cualquier medio (Webb, 1975).

### SISTEMA EXPERIMENTAL.

En la literatura se reportan distintos procedimientos para evaluar el arrastre de forma experimental; por ejemplo estimando la aceleración que adquiere el pez a consecuencia de la fuerza de gravedad cuando este se encuentra dentro de una columna de agua, (Magnan y Stlaqui, 1929; Richardson, 1936; Gero, 1952); por medio de la desaceleración producto de la fuerza de arrastre que presentan los cuerpos al desplazarse en un medio fluido (Magnan, 1930; Gray, 1957; Lang y Daybell, 1963; Johnson *et al.*, 1972), o sometiendo a los organismos dentro de un flujo en túneles de agua con la implementación de distintos tipos de balanza para estimar la fuerza que se opone al movimiento (Houssay, 1912; Magnan, 1930; Kempf and Neu, 1932; Denil, 1936; Kent *et al.*, 1961; Sundness, 1963; Brett, 1963; Pope y Harper, 1966; Webb, 1970). El sistema diseñado para esta investigación se basa en la utilización de una balanza y un túnel de

agua. De acuerdo a algunos autores, la utilización de túneles de agua es ventajosa sobre otros sistemas ya que el organismo puede ser observado durante el (Webb, 1970). Mientras que la utilización de balanzas permite estimar la fuerza con la que un organismo es empujado por una corriente de agua (Brett, 1963; Webb, 1970).

Aunque nuestro sistema no permite estimar el arrastre originado por peces durante su actividad natural, dado que se utilizan organismos sacrificados, el sistema permitió estimar la fuerza de arrastre que sufren los organismos sumergidos en distintas velocidades de corriente. En este estudio, la fuerza de arrastre se calculó como una fuerza resultante o total, es decir el sistema no permite detectar por separado los distintos componentes de un arrastre total el cual se compone de tres partes. El arrastre de fricción, el arrastre de presión y el arrastre inducido, siendo este último el que se origina por los movimientos ondulatorios y transversales del organismo respecto al flujo (Hoerner, 1958; Elder, 1960; Lighthill, 1969; Webb, 1975; Vogel, 1994).

En nuestro sistema, en contraste con aquellos trabajos donde utilizan una balanza para cuantificar el arrastre, los sujetos experimentales son colocados de forma horizontal, imposibilitándolos de cualquier movimiento transversal al flujo por medio de una viga central (Brett, 1963, Fig 3; Pope y Harper 1966; Webb, 1970, Fig 4). En contraste, en nuestro sistema, los organismos están totalmente suspendidos de forma vertical sin ninguna estructura que corrija su posición dentro de

la cámara de trabajo (Fig. 7). Para fines de esta investigación, el sistema es adecuado ya que el principal objetivo es estimar el arrastre total que sufren los machos del género *Xiphophorus* en distintas velocidades de la corriente.

Uno de los sistemas más modernos diseñados para estimar el arrastre fue el que desarrollo Sagnes *et al.*, (2000), este sistema cuenta con un transductor de señal así como con un sistema de cómputo, el cual determina el arrastre de peces sumergidos (Fig 5). Aunque nuestro sistema es menos sofisticado, al contar únicamente con una balanza como estimador de la fuerza de arrastre, el sistema fue lo suficientemente sensible para detectar el efecto de la velocidad de la corriente, la talla y el grado de expresión del ornamento sobre la fuerza de arrastre.

El sistema experimental, sin embargo presenta ciertas limitantes: una de ellas es que el arrastre es detectado de manera confiable únicamente a velocidades superiores a 0.217m/s, dado que la balanza mostró registros inestables a menores velocidades. No obstante, considerando que los machos adultos de esta especie pueden llegar a mantener el nado por intervalos de 5 minutos a velocidades de 0.26 y 0.49 m/s (velocidad crítica máxima, Kruesi, 2004), las velocidades utilizadas en el sistema son apropiadas para trabajar con estos organismos ( $V_{\min} = 0.217$  m/s y  $V_{\max} = 0.387$  m/s).

Al comparar los valores de arrastre obtenidos en este estudio con otros trabajos reportados en la literatura (Harris, 1936; Denil, 1936; Sundeness, 1963; Brett, 1963; Webb, 1970), resulta difícil debido a las particularidades de los sistemas experimentales utilizados (que estiman distintos componentes del arrastre), a las diferencias morfológicas de los organismos, a su talla ya las velocidades de la corriente implementadas.

#### ARRASTRE CON ESPADA NATURAL Y ARTIFICIAL.

Para evaluar el efecto de espadas naturales de distintas dimensiones en el arrastre era necesario tener organismos morfológicamente idénticos, cuya única variante fuese el tamaño del ornamento. Esto debido a que los componentes que determinan la fuerza de arrastre, como las fuerzas inerciales y de presiones, son afectados por la forma y volumen general de los cuerpos que se desplazan en un fluido (Webb, 1975). Encontrar organismos morfológicamente idénticos es casi imposible, dado que el cuerpo de los organismos puede variar tanto en longitud, grosor, altura y volumen, aun siendo individuos en apariencia similares. Por esto fue necesario recurrir a la manipulación del espécimen en este experimento.

En la naturaleza, la variabilidad de la talla de machos y la longitud de la espada es muy amplia, donde la longitud de la espada al parecer no se relaciona con la talla del macho (Kruesi, 2004). Por esta razón se diseñaron y construyeron espadas artificiales de diferentes longitudes que pudieran colocarse a un mismo individuo. Las espadas artificiales

no mostraron diferencia alguna en cuanto al arrastre generado, respecto a las espadas naturales de iguales dimensiones. Esto se explica parcialmente al considerar que el acetato, material con que se construyó la espada artificial, presenta una flexibilidad al parecer similar a una espada. Esto último debido a que la flexibilidad de los cuerpos modifica considerablemente los valores de arrastre (Sagnes *et al.*, 2000). Así el utilizar espadas artificiales permitió estimar el arrastre en función de la longitud del ornamento utilizando a un mismo sujeto experimental.

#### EFFECTO DE LA TALLA SOBRE EL ARRASTRE.

Aunque el arrastre de los cuerpos con frecuencia se expresa en función de la superficie corporal y el área de la sección transversal del organismo (Webb, 1975; Vogel, 1994; Lighthill, 1969; Hoerner, 1958), en este estudio expresamos el arrastre en términos de una variable morfológica que se refiere a una dimensión lineal (longitud total) ya que está es una de las medidas de la talla mas descriptivas.

La talla tiene un fuerte efecto sobre el arrastre dado que incrementa la longitud y superficie corporal (Randall *et al.*, 1997), es decir el arrastre total se incrementa con la talla de un animal nadador. La velocidad también tiene un efecto importante sobre la fuerza de arrastre. Esto concuerda con nuestros resultados donde el mayor arrastre siempre se presenta a las máximas velocidades de la corriente a las cuales fueron expuestos los organismos, con y sin espada. Siendo importante señalar que la variable velocidad contribuye

en mayor grado en el arrastre en comparación con la longitud del organismo (talla). Esto se puede observar con mayor claridad a partir de la ecuación de arrastre teórico de tipo Newtoniana que describe el arrastre total ( $D_T$ ).

$$D_T = \left(\frac{1}{2} \rho U^2\right) (S_w) (C_T)$$

Donde " $\rho$ " es densidad del agua ( $\text{Kg m}^{-3}$ ), " $U^2$ " es la velocidad relativa del pez (m/s), " $S_w$ " es el área o superficie mojada del pez ( $\text{m}^2$ ), y " $C_T$ " es el coeficiente de arrastre (Webb 1975, Vogel 1994; Lighthill 1969; Hoerner, 1958). De tal manera que para un objeto de forma determinada, la resistencia hidrodinámica se ve afectada proporcionalmente a su superficie y en forma cuadrática respecto a la velocidad.

El arrastre generado en distintas velocidades ha sido estimado para diferentes especies, sin embargo debido a que los estudios se han realizado con peces de tallas muchos mayores a los usados en este estudio es difícil establecer una comparación con nuestros datos.

En particular, los valores de arrastre obtenidos de manera experimental en este estudio pudieran ser comparados con los obtenidos por Denil (1936) reportados por Webb (1975), ya que Denil utilizó un organismo con dimensiones lineales cercanas a la de los especímenes experimentales empleados en esta investigación. Denil describe el arrastre en función de la velocidad para un pez pelágico (modelo de pez pelágico muerto), el cual presentaba una longitud estándar de 10 cm con una área  $40 \text{ cm}^2$  mientras que nosotros

utilizamos al organismo número 5 con 5.5 cm de longitud y una área de 16.1 cm<sup>2</sup>. El hecho de que el arrastre del pez pelágico resulte mayor que el de *X. helleri* puede deberse que el primero es un organismo de mayor talla (Fig. 19).

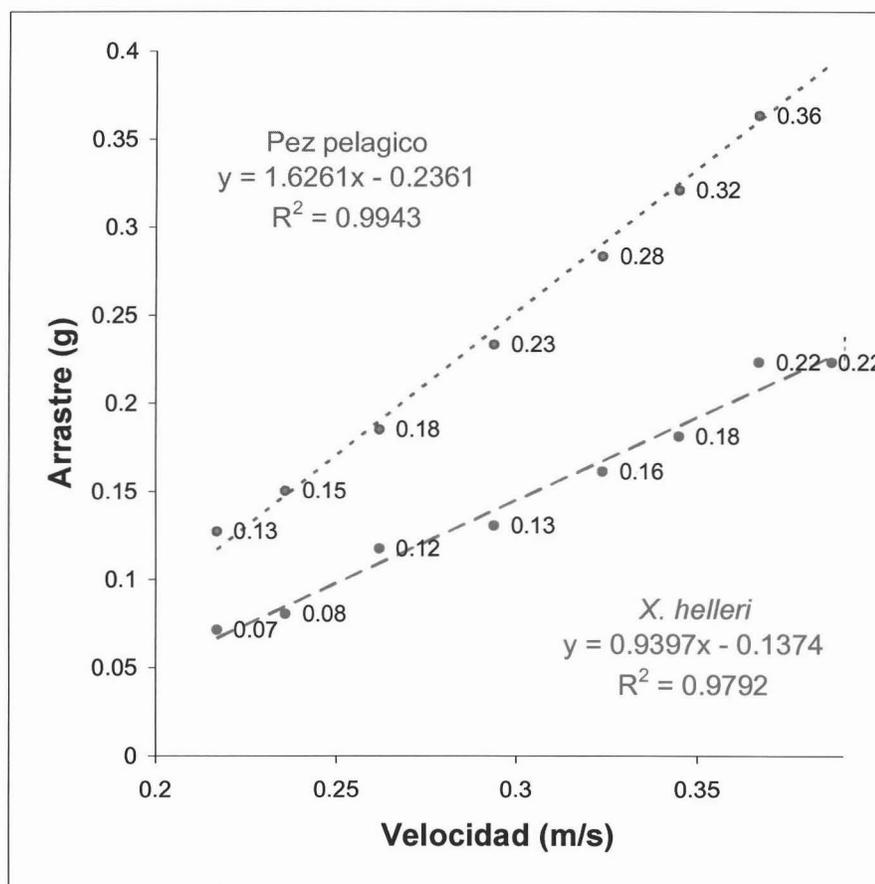


Fig. 19- Valores de arrastre obtenidos para un espécimen de *X. helleri* sin espada y un modelo de pez pelágico utilizado por Denil en 1936 en distintas velocidades de corriente.

Es importante considerar que aunque los organismos de mayor talla experimentan un arrastre mayor como lo muestran nuestros resultados, estos presentan una proporción superficie/volumen menor, por lo que experimentan una menor resistencia del fluido por unidad de masa que los organismos pequeños. A los organismos pequeños les es más difícil

vencer la resistencia al avance por su menor masa muscular (proporción superficial), considerando que al aumento en talla de los organismos le corresponde un incremento en la capacidad de nado en cuanto a la velocidad máxima que puedan desarrollar (Tolley y Torres, 2001). La velocidad de un animal nadador es proporcional a la relación potencia/arrastre o empuje/arrastre. La potencia desarrollada por un músculo al contraerse es directamente proporcional a la masa muscular. Asumiendo que la masa muscular aumenta en proporción con la masa corporal total, la potencia o empuje aumenta con la talla (Randall *et al.*, 1997; Pettersson y Bronmark, 1999).

#### ARRASTRE GENERADO POR LA ESPADA.

La dimensión y la forma de la aleta caudal afectan sustancialmente el nado en cuanto a la fuerza de propulsión generada y debido a que forma parte de la estructura anatómica del pez que contribuye a la resistencia al desplazamiento (Yates, 1983; Weighs, 1989; Videler, 1993). En términos hidrodinámicos, la forma de los cuerpos es usualmente caracterizada por un cociente denominado razón de fineza "FR" (largo del cuerpo / diámetro máximo del cuerpo). Los cuerpos que presentan, valores de una relación de fineza de 4.5 minimizan el arrastre generado (Webb, 1975; Jobling, 1995). Mientras que en cuerpos que muestran valores de FR de 3 a 7 el arrastre incrementa alrededor de 10%, respecto al valor óptimo donde se ve minimizado el arrastre (4.5). Así, cuerpos que presentan valores que van de 3 a 7 son reconocidos como cuerpos hidrodinámicos. En este estudio, los organismos que no presentan la espada entran dentro este rango, de

acuerdo a su FR; mientras que los especímenes que presentan una espada (de largo equivalente a 100% de su longitud total LT) mostraron valores de FR entre 8.6 a 12.3, mismos que se encuentran por fuera del intervalo de los cuerpos hidrodinámicos (Fig. 20). Por lo anterior es de esperarse que la espada represente una desventaja en términos hidrodinámicos. Esto concuerda con nuestros resultados donde los valores de arrastre son menores cuando la estructura es eliminada.

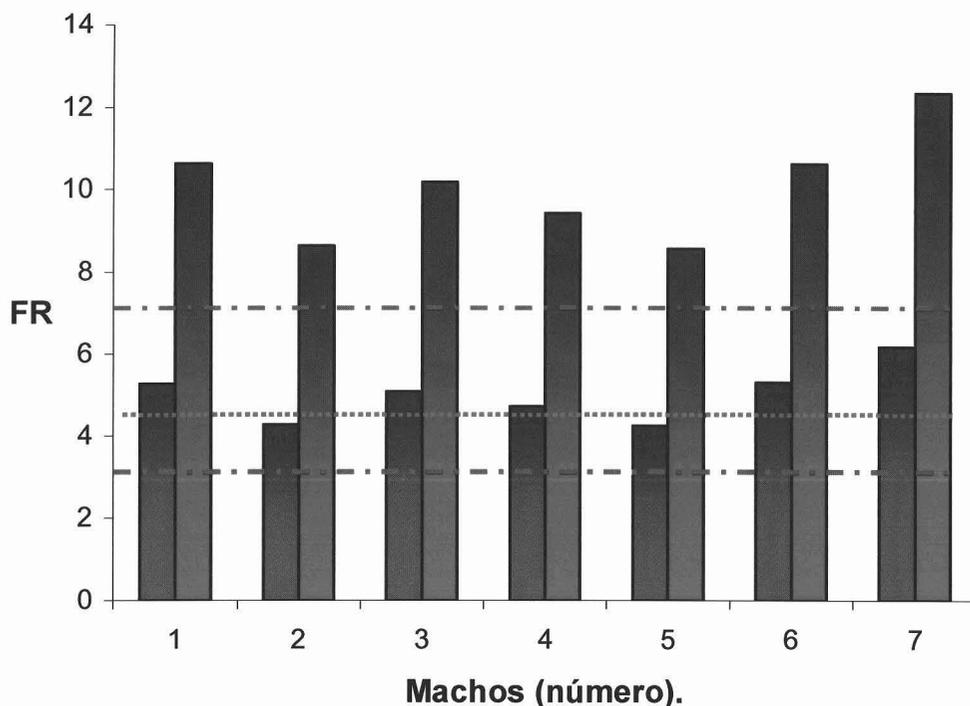


Fig. 20.- Razón de fineza de machos con y sin espada. Las barras en azul indican el FR de peces sin la espada, las barras de color rojo muestran el FR de los especímenes con la estructura. Las líneas punteadas de color azul muestran el intervalo de FR de los cuerpos hidrodinámicos que va de 3 a 7, la línea continua de color rojo representa el valor óptimo de mínimo arrastre con un valor de 4.5.

Existen pocos trabajos donde se ha reportado el efecto causado por las dimensiones de la aleta caudal en la resistencia al avance. Nicoletto (1991) midió la velocidad crítica en machos guppy *Poecilia reticulata*, los cuales presentan variación en cuanto a forma de la aleta caudal. Sus resultados no mostraron diferencia alguna entre las aletas caudales de diversas formas en cuanto a la velocidad crítica máxima. Sin embargo, el autor sugiere que en *P. reticulata* los diferentes morfotipos de la aleta caudal no tienen efecto en la velocidad crítica debido a que aun en diferentes formas todos los tipos de aleta caudal presentan la misma superficie (área), y con eso generarían un mismo arrastre. Así mismo, Webb (1970) amputó la aleta caudal de los salmones sockeye (*Oncorhynchus nerka*). En este caso, no se observaron diferencias en cuanto a la cinética de nado, ni en las tasas metabólicas medidas durante el nado de los peces, sugiriendo que la aleta caudal en estos organismos no participa de manera significativa en la propulsión, ni contribuye a la generación de arrastre durante el nado. Por otro lado, se ha encontrado que aletas caudales con dimensiones mayores representan desventajas en cuanto a la actividad de nado, tal es el caso de los peces zebra (*Danio rerio*) en los cuales se observa que los morfotipos que presentaban una aleta caudal de mayor tamaño (superficie y longitud) en comparación con los de una cola en forma lobulada de menor tamaño alcanzan una velocidad crítica de nado menor (Plautt, 2000). Particularmente, en peces del género *Xiphophorus* se ha podido demostrar que la prolongación de los radios inferiores en forma de espada disminuye el desempeño de nado estimado a partir de la velocidad crítica máxima (Kruesi, 2004),

Asimismo, se ha demostrado que esta estructura incrementa el gasto metabólico en nado rutinario y durante las actividades de cortejo (Basolo y Alcaraz, 2003). Los autores de estos trabajos sugieren que la disminución de la velocidad crítica y el aumento en el consumo de oxígeno durante el nado de rutina y de cortejo pueden atribuirse al efecto que tiene la estructura sobre el arrastre, incrementando la resistencia al nado y los gastos energéticos asociados a esta actividad. En el presente trabajo se demuestra que en efecto la espada genera un incremento en el arrastre.

Por un lado se demuestra que el arrastre disminuye notoriamente cuando la estructura es eliminada (Fig. 8), pero además que el arrastre se incrementa con la longitud del ornamento (Fig. 12 y 13). Estos resultados confirman la hipótesis planteada en este estudio, donde se predice que el arrastre se incrementa por la presencia del ornamento y con su dimensión factor determinante en la generación del arrastre.

En su trabajo, Kruesi (2004) reporta que el incremento de la velocidad crítica máxima (VCM) de los machos al eliminar la espada no se relaciona con la dimensión de la espada extirpada. En contraste en este estudio se demuestra que el arrastre generado por la espada se incrementa con la dimensión de la misma. Los resultados obtenidos por Kruesi (2004) y los generados en este trabajo pueden atribuirse a las diferencias biológicas asociadas al potencial de los organismos. Es decir, si fuera la fuerza de arrastre el único factor que explicara la disminución de la capacidad de nado (VCM) de los peces, los resultados obtenidos por Kruesi; deberían

señalar que entre mayor sea la dimensión de la espada disectada mayor sería el incremento en la velocidad crítica máxima estimada al eliminar la estructura. Así, aunque este estudio se realizó con organismos sacrificados, los resultados sugieren que existen diferencias en el potencial metabólico de nado en los peces que hacen que la estructura tenga diferentes costos de nado relativo, donde los individuos con espadas más largas tendrán mayor potencial de contrarrestar el efecto del arrastre.

Este trabajo de investigación tiene gran relevancia debido a que se demuestra por primera vez que la espada presente en el género *Xiphophorus* representa costos en términos hidrodinámicos. A diferencia de los trabajos anteriores se elimina la variabilidad intrínseca o individual que pudieran tener los organismos, utilizando elementos puramente físicos; es decir se presenta una estimación en términos físicos que demuestran el costo asociado directamente al carácter sexual secundario presente en machos del género *Xiphophorus*.

De acuerdo a Basolo (1996) el carácter sexual secundario que presentan los machos de género *Xiphophorus* les confiere una ventaja en términos de incrementar su éxito reproductivo al aumentar su probabilidad de ser seleccionados por las hembras. Sin embargo, de acuerdo a los resultados de nuestro estudio la espada representa una mayor resistencia al avance, por lo que representa una desventaja en términos hidrodinámicos. Uno de los aspectos importantes en la teoría de las desventajas se basa en los costos de los ornamentos, donde los

organismos con la mayor expresión del carácter sexual secundario soportan mayores costos lo cual puede relacionarse con el índice de su calidad. Este trabajo de investigación aporta información sobre el incremento de costos dependiente de la expresión del ornamento, brindando evidencias de que la teoría de las desventajas podría explicar la preferencia de las hembras por los machos con espadas mas desarrolladas.

## CONCLUSIONES.

- 1.- La espada de los machos incrementa el arrastre de los organismos.
- 2.- La fuerza de arrastre generada por la espada se incrementa con la dimensión de la misma.
- 3.-La longitud del organismo y la velocidad de la corriente presentan un efecto significativo en el arrastre, donde la velocidad contribuye en mayor grado sobre el arrastre que la talla.
- 4.- Los valores mas altos en el arrastre se presentaron en los organismos de mayor talla, con espada presente y expuesto a la máxima velocidad de corriente.

organismos con la mayor expresión del carácter sexual secundario soportan mayores costos lo cual puede relacionarse con el índice de su calidad. Este trabajo de investigación aporta información sobre el incremento de costos dependiente de la expresión del ornamento, brindando evidencias de que la teoría de las desventajas podría explicar la preferencia de las hembras por los machos con espadas mas desarrolladas.

## CONCLUSIONES.

- 1.- La espada de los machos incrementa el arrastre de los organismos.
- 2.- La fuerza de arrastre generada por la espada se incrementa con la dimensión de la misma.
- 3.-La longitud del organismo y la velocidad de la corriente presentan un efecto significativo en el arrastre, donde la velocidad contribuye en mayor grado sobre el arrastre que la talla.
- 4.- Los valores mas altos en el arrastre se presentaron en los organismos de mayor talla, con espada presente y expuesto a la máxima velocidad de corriente.

## **BIBLIOGRAFIA.**

- Alvarez, J.** 1950. Claves para la determinación de especies en los peces de aguas continentales mexicanas. Secretaría de Marina. Dirección General de Peces e Industrias Conexas. México.
- Basolo, A. L.** 1990a. Female preference predates the evolution of the sword in swordtail fish. *Science*. 250: 808-810.
- Basolo, L. A.** 1990b. Female preference for male sword length in the green swordtail *Xiphophorus helleri* (Pisces, Poeciliidae). *Anim. Behav.* 40: 332-338.
- Basolo, L. A.** 1995a. A further examination of a preexisting bias favoring a sword in the genus *Xiphophorus*. *Anim. Behav.* 50: 365-375.
- Basolo, A. L.** 1995b. Phylogenetic evidence for the role of a pre-existing bias in selection. *Proc. R. Soc. Lond, B.* 259: 307-311.
- Basolo, L. A.** 1996. The phylogenetic distribution of a female preference. *Syst. Biol.* 45 (3): 290-307.
- Basolo, L. A.** 1998. Shift in investment between sexually selected traits: tamishing of the silver spoon. *Anim. Behav.* 55: 665-671.
- Basolo, L. A. y G. Alcaraz.** 2003. The turn of the sword: length increases the cost of courtship in swordtails. *Proc. Roy. Soc. Lond. B.* 270: 1631-1636.
- Bernadsky, G., N. Sar y E. Rosenberg.** 1993. Drag reduction of fish skin mucus: relationship to mode of swimming and size. *J. Fish. Biol.* 42: 797-800.
- Brett, J. R.** 1963. The energy required for swimming by young sockeye salmon with a comparison of the drag force on dead fish. *Trans. R. Soc. Can. I, Ser.* (4): 441-457.
- Candolin, U.** 1999. The relationship between signal quality and physical condition: is sexual signal honest in the three - spined stickleback? *Anim. Behav.* 58: 1261-1267.

- Darwin, C.** 1871. *The Descent of Man and Selection in relation to Sex* (John Murray, London).
- Denil, G.** 1936. *La mécanique du poisson de rivière; qualité nautique du poisson; ses méthodes locomotrices; ses capacités; ses limites; résistance du fluide; effect de la vitesse, de la pente; resistance du seuil.* Bruxelles. 395 p.
- Elder, J. K.** 1960. The flow past a plate of finite width. *J. Exp. Biol.* 60: 581-591.
- Endler, J. A.** 1984. Natural and sexual selection on color pattern in poeciliid fishes. *Environ. Biol. Fish.* 9: 137-190.
- Espinoza, H. P. et al.** 1993. Listado faunístico de México III. Los peces dulceacuicolas mexicanos. Depto. de Zoología, I. B. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Gero, D. R.** 1952. The hydrodynamic aspects of fish propulsion. *Amer. Mus. Novit.* 1601: 1-32.
- Grafen, A.** 1990. Biological signal as handicaps. *J. Theor. Biol.* 144:517-546.
- Gray, J.** 1957. How fish swim. *Sci. Am.* 197: 48-54.
- Harris, J. E.** 1936. The role of fins in the equilibrium of swimming fish. 1) Wind- tunnel test on a model of *Mustelus canis* (Mitchell). *J. Exp. Biol.* 13: 476-493.
- Hass, V.** 1993. *Xiphophorus* phylogeny, reviewed on the basis of the courtship behavior. En *Trends in Ichthyology* (J. H. Schroeder, J. Bauer y M. Scharf, eds.). Blackwell, Londres. 279-288.
- Hoerner, S. F.** 1958. *Fluid- dynamic drag.* Capitulo 13. Publicado por el Autor. Midland Park, N. J
- Houssay, S. F.** 1912. *Forme, puissance et stabilité des poissons.* Herman, Paris. 372 p.
- Jerrold H. Z.** 1999. *Biostatistical Analysis.* 4ta Edición. New Jersey. pp.

- Jobling, M.** 1995. Environmental Biology of fishes. Chapman & Hall. Great Britain. 445p.
- Johnson, W., P. D. Soden, y E. R. Trueman.** 1972. A study in jet propulsion: An analysis of the motion of the squid, *Loligo vulgaris*. *J. Exp. Biol.* 56: 155-165.
- Kempf, G. y W. Neu.** 1932. Schlepversuche mit Hechten sur Messung des Wasserwiderstandes. *Z. Wiss. Biol. C.* 17: 353-364.
- Kent, J. C., A. Delacy, T. Hirota, y Hirota, y B. Bates.** 1961. Flow visualization and drag about a swimming fish. *Fish. Res. Inst. Coll. Fish., Univ. Wash. Tech. Rep.* 23p.
- Ketherine, L. B. y Evans R. M.** 2000. Behavior Ecology. University of Stirling, Stirling. Vol. 11. No 2: 228 - 238.
- Kotiaho, S. J.** 2000. Testing the assumptions of conditional handicap theory: cost and condition dependence of sexual selected trait. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 48: 188-194.
- Kruesi, K. C.** 2004. Desempeño de nado en machos de *Xiphophorus montezumae*: "El costo de un ornamento". Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, U.N.A.M.
- Lang, T. G., y D. A. Daybell.** 1963. Porpoise performance tests in seawater tank. *Nav. Ord. Test Stat. Teach. Rep.* 3063: 1-50.
- Lighthill, M. J.** 1969. Hydromechanics of aquatic animal propulsion. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 1: 413-466.
- Magnan, A.** 1930. Les caractéristiques géométriques et physiques des poissons. *Ann. Sci. Nat. Zool.* (10) 13: 355-489.
- Magnan, A. & Sainte. Lague, A** 1930. Résistance á l'avancement et puissance des poissons. *Bull. Tech. Serv. Aérotech., Paris* 71: 1-107
- Magnan. A. y A. Stlaqui.** 1929. Essai de théorie du poisson. *Bull. Teach. Serv. Aerotech. Paris.* 50: 1-180.

- Meffe, G. y F. F. Snelson, 1989.** Ecology and evolution of livebearing fishes (Poeciliidae). Prentice Hall. Englewood Cliffs. Nueva Jersey.
- Meyer, A., J. Morrissey, y M. Scharl. 1994.** Molecular phylogeny of fishes of the genus *Xiphophorus* suggest repeated evolution of a sexually selected trait. *Nature*. 368: 539-542.
- Nelson, J S. 1994.** Fisher of the world. 3ra edición. John Wiley & Sons. New York.
- Nicoletto, P. F. 1991.** The relationship between male ornamentation and swimming performance in the guppy, *Poecilia reticulata*. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 28: 365- 370.
- Parenti, L. R. y M. Rauchenberger. 1989.** Systematic overview of the poeciliinaes. In: Ecology and Evolution of Livebearing Fishes (Poeciliidae). Eds. C. K. Meffe y F. F. Snelson. Pp 1-12. Prentice Hall. New Jersey, E. U. A.
- Pettersson, L. B y C. Bronmark. 1999.** Energetic consequences of an inducible morphological defence in crucian carp. *Oecologia*. 121: 12-18.
- Plaut, I. 2000.** Effects of fin size on swimming performance, swimming behavior and routine activity of zebrafish *Danio rerio*. *J. Exp. Biol.* 203: 813-820.
- Pope, A., y J. J. Harper. 1966.** Low speed wind tunnel testing. John Wiley and Sons Inc., New York, N. Y. 474 p.
- Randall et al. 1997.** Fisiología animal. Mecanismos y Adaptaciones 4ta edición. Madrid. 795 pp.
- Rauchenberger, M., K. D. Kallman y D. C. Morizot. 1990.** Monphyly and geography of the Panuco Basin swordtails (genus *Xiphophorus*) with descriptions of four new species. *Am. Mus. Novit.* 2974: 1:41.
- Richardson, E. G. 1936.** The physical aspects of fish locomotion. *J. Exp. Biol.* 13: 63-74.

- Rosen, D. E.** 1979. Fishes from the uplands and intermontane basins of Guatemala: Revisionary studies and comparative geography. *Bull. Am. Mus. Nat. Hist.* 162: 267-376.
- Rosen, D. E. y E. O. Bailey.** 1963. The Poeciliid fishes (Cyprinodontiformes), their structure, zoogeography and systematic. *Bull. Am. Mus. Nat. Hist.* 162: 267-376.
- Rosenthal, G. G., T. Y. F., Martinez, F. J. García León, M. J. Ryan.** 2001. Shared Preferences by Predators and females for Male Ornaments in Swordtails. *The American Naturalist.* 158: 146-154.
- Sagnes, P., Champagne J. Y., Morel R.** 2000. Shifts in drag and swimming potential during graylings ontogenesis: relations with habitat use. *J. Fish. Biol.* 57: 52-68.
- Slater, P. J. B. y T. R. Halliday.** 1994. Behavior and Evolution. Cambridge University Press, Cambridge.
- Sundnes, G.** 1963. Energy metabolism and migration of fish. ICNAF Environ. Symp. Spec. Publ. 6: 743-746.
- Tolley, S. G. y J. J. Torres.** 2002. Energetics of swimming in juvenile salmon snook (*Centropomus undecimalis*). *Environ. Biol. Fish.* 63: 427-433.
- Videler J. J.** 1993. Fish swimming. Chapman & Hall, London. 350pp.
- Vogel, S.** 1994. Life in moving fluids, 2da edición Princeton University Press, Princeton N. J.
- Webb, P. W.** 1975. Hydrodynamics and energetics of fish propulsion. *Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada.* 190 : 1-160.
- Webb, P. W.** 1970. Some aspects of the energetics of swimming offish with special reference to the cruising performance of rainbow trout. Ph. D. Tesis. Univ. Bristol. Bristol, England. 189 p.
- Weighs, D.** 1989. Design features and mechanics of axial locomotion in fish. *Am. Zool.* 29: 151-160.

**Yates, G. T.** 1983. Hydromechanics of body and caudal fin propulsion. In fish Biomechanics, capitulo 6 (ed. P. W. Webb and D. Weihs), pp 177-212. New York: Praeger Scientific.

**Zahavi, A.** 1975. Mate selection - A selection for a handicap. *J. Theor. Biol.* 53: 205-214.