UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Variabilidad genética y fenotípica del Bocachico (*Prochilodus magdalenae*) de la ciénaga de Zapatosa Cesar

Elianny Pacheco Peñaranda

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Palmira, Colombia
2019

Variabilidad genética y fenotípica del Bocachico (*Prochilodus magdalenae*) de la ciénaga de Zapatosa Cesar

Elianny Pacheco Peñaranda

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ciencias Agrarias

Director:

Ph.D., Jaime Eduardo Muñoz Flórez

Codirectora:

Ph.D., Luz Ángela Álvarez Franco

Línea de Investigación:

Producción animal tropical

Grupo de Investigación:

Diversidad biológica

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Palmira, Colombia

2019

(Dedicatoria)

A Dios, porque sin el nada de esto sería posible y por darme las fuerzas necesarias para realizar este sueño; A mi esposo, por embarcarse conmigo en esta gran travesía y por su apoyo incondicional; A mi familia, por sus consejos, cariño y orientación; por estar para mí en los momentos difíciles.

Agradecimientos

A la gobernación del Cesar por la beca otorgada para el inicio de este gran sueño.

A la Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira por darme la oportunidad de formarme y adquirir nuevos conocimientos.

A mis compañeros Latife Luquez Perez, Illgner Ali Eddy Contretas Almazo, Nelly Velazco Posada, Eduard Jose Arias Vanegas y Luis Angel Acosta Murgas con quienes compartimos experiencias académicas, y en quienes siempre encuentro un apoyo.

Al profesor Carlos Alberto Jaramillo Cruz porque fue quien me incentivó para tomar el camino de la investigación en peces.

Al profesor Jaime Eduardo Muñoz Florez por su apoyo a la hora de realizar mis actividades puesto que siempre estuvo presto a colaborar abriéndome las puertas en el laboratorio de molecular donde desarrolle gran parte de mi tesis.

A la profesora Luz Angela Alvarez quien siempre estuvo atenta a todas mis inquietudes y me acompaño en este proceso.

Al grupo de investigación en diversidad biológica y a todos los compañeros que hacen parte de este grupo porque de alguna forma aportaron al desarrollo de mi tesis en especial a Paula Andrea Rugeles, a Paola Andrea Martinez, a Edilma Velez Sinisterra, a Ruben Dario gracias a ellos por su compañía y por sus aportes.

Al grupo de investigación en Recursos zoogenéticos quienes también me brindaron su apoyo y acompañamiento en la realización de la tesis en especial a Angela Maria Vinasco quien me brindó su ayuda.

Al CIAT en especial a Constanza Quintero y Yeny Patricia Zapata por abrirme las puertas de su laboratorio para realizar parte de mi proyecto.

A Diana Lopez, por su colaboración en los análisis genéticos, por su paciencia y dedicación para enseñarme.

A Pedro Jiménez por su ayuda en este nuevo mundo de la morfometría geometría.

Al equipo que estuvo detrás de este proyecto en especial a Vanessa Román Morales y a Adriana Rueda Hurtado quienes nos brindaron el apoyo pese a las dificultades que se presentaron.

Resumen

La ciénaga de Zapatosa (CZ) es un ecosistema de gran importancia en el departamento del Cesar y del Magdalena en Colombia por su gran diversidad de especies animales y vegetales, y por ser una de las principales fuentes de sostenimiento para las familias que viven allí. El escaso conocimiento biológico y genético de las especies ícticas, trae como consecuencia malos manejos de repoblamiento que impactan las especies y el ecosistema. Una de las especies con mayor importancia es el bocachico (*Prochilodus magdalenae*) el cual se encuentra en estado vulnerable. El objetivo de este proyecto fue estimar la variabilidad genética y fenotípica de esta especie en la CZ del departamento del Cesar. Se colectaron 223 ejemplares de *Prochilodus magdalenae* en nueve sitios de la CZ. Para la variabilidad fenotípica se realizó morfometría geométrica (MG) utilizando IMP (Integrated Morphometrics Package) y MophoJ. Para los análisis de variabilidad genotípica se usó genotipificación por secuenciación (GBS). Los análisis morfométricos indicaron que la varianza de la forma no estaba influenciada por el dimorfismo sexual o la alometría; los componentes principales explicaron el 62.69% de la varianza y las variables canónicas mostraron una clara diferenciación entre los sitios Pelaya y Tamalameque con los demás sitios de muestreo; el MANOVA indicó que el 45.16% de la varianza es explicada por las diferencias de forma entre grupos. Para los análisis genéticos, se obtuvieron 6277 SNPs polimórficos que mostraron baja diferenciación poblacional, moderada variabilidad genética y alto flujo genético. Se encontró diferenciación a nivel morfológico, pero no a nivel genético entre los sitios de muestreo.

Palabras clave: Ciénaga de Zapatosa, GBS, IMP, morfometría geométrica, *Prochilodus magdalenae*, SNP, variabilidad genética.

Abstract

The swamp of Zapatosa (CZ) is an ecosystem of great importance in the department of Cesar and Magdalena in Colombia for its great diversity of animal and plant species, and for being one of the main sources of sustenance for the families that live there. The scarce biological and genetic knowledge of the fish species, results in inadequate repopulation management that impacts the species and the ecosystem. One of the most important species is the bocachico (*Prochilodus magdalenae*) which is in a vulnerable state. The objective of this project was to estimate the genetic and phenotypic variability of this species in the CZ department of Cesar. 223 specimens of *Prochilodus magdalenae* were collected in nine sites of the CZ. Geometric morphometry (MG) was performed for phenotypic variability using IMP (Integrated Morphometrics Package) and MophoJ. Genotyping by sequencing (GBS) was used for genotypic variability analyzes. Morphometric analyzes indicated that the variance of the form was not influenced by sexual dimorphism or allometry; the main components explained 62.69% of the variance and the canonical variables showed a clear differentiation between the Pelaya and Tamalameque sites with the other sampling sites; the MANOVA indicated that 45.16% of the variance is explained by the differences in form between groups. For genetic analysis, 6277 polymorphic SNPs were obtained that showed low population differentiation, moderate genetic variability and high genetic flux. Differentiation was found at the morphological level, but not at the genetic level between the sampling sites.

Keywords: Swamp of Zapatosa, GBS, IMP, geometric morphometry*, Prochilodus magdalenae*, SNP, genetic variability.

Contenido

Pág.

1. Planteamiento del problema 3

2. Objetivos 7

3. Justificación 9

4. Marco teórico 13
4.1 La ciénaga de Zapatosa 13
4.2 La pesca en la ciénaga de Zapatosa 14
4.3 El Bocachico (*Prochilodus magdalenae* Steindachner 1878) 16
4.3.1 Generalidades 16
4.3.2 Clasificación taxonómica 16
4.3.3 Migración 17
4.3.4 Ciclo de vida y reproducción 19
4.3.5 Estudios genéticos en bocachico (*P. magdalenae*) 19
4.4 Marcadores genéticos en peces 22
4.5 Polimorfismo de nucleótido simple (SNP por sus siglas en inglés) 23
4.6 Genotipificación por secuenciación (GBS por sus siglas en inglés) 24
4.7 Morfometría geométrica (MG) 25

5. Materiales y métodos 29
5.1 Sitios de muestreo 29
5.2 Recolección de muestras ícticas 31
5.3 Caracterización fenotípica 31
5.3.1 Morfometría geométrica con programas IMP 31
5.3.2 Morfometría geométrica con MorphoJ 34
5.4 Caracterización genética y molecular 34
5.4.1 Macroextracción de ADN 34
5.4.2 Verificación de la calidad del ADN 35
5.4.3 Genotipificación por secuenciación (GBS) 35
- **5.4.3.1 Requerimientos de las muestras para el método GBS** 35
- **5.4.3.2 Optimización y validación de la enzima de restricción** 36
- **5.4.3.3 Preparación y secuenciación de la librería** 36
- **5.4.3.4 Identificación o llamamiento de SNP** 36

5.4.4 Análisis poblacionales de variabilidad genética 36
- **5.4.4.1 Procedimientos previos para los análisis genéticos** 36
- **5.4.4.2 Análisis exploratorios** 37
- **5.4.4.3 Parámetros poblacionales** 37
- **5.4.4.4 Diferenciación y flujo genético** 37

6. Resultados 39
6.1 Caracterización Fenotípica 39
6.1.1 Morfometría geométrica entre machos y hembras 41
6.1.2 Morfometría geométrica entre sitios 43
- **6.1.2.1 Regresión múltiple** 43
- **6.1.2.2 Análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés)** 43
- **6.1.2.3 Análisis de variables canónicas (CVA, por sus siglas en inglés)** 45
- **6.1.2.4 Análisis de varianza (ANOVA)** 48
- **6.1.2.5 Análisis discriminante** 48

6.1.3 Morfometría geométrica entre Ríos y ciénagas 50
6.2 Caracterización genética y molecular 51
6.2.1 Cuantificación y verificación de la calidad del ADN 51
6.2.2 Genotipificación por secuenciación (GBS) 53
- **6.2.2.1 Optimización y validación de la enzima de restricción** 53
- **6.2.2.2 Preparación y secuenciación de librerías y llamamiento de SNPs.** 54

6.2.3 Análisis poblacionales de variabilidad genética 54
- **6.2.3.1 Análisis exploratorios** 54
- **6.2.3.2 Parámetros poblacionales** 57
- **6.2.3.3 Diferenciación y flujo genético** 59

7. Discusión 61
7.1 Caracterización Fenotípica 61
7.2 Caracterización Genética y molecular 64
7.2.1 Parámetros poblacionales 65
7.2.2 Estructura y flujo genético 67

8. Conclusiones y recomendaciones 71
8.1 Conclusiones 71
8.1.1 Caracterización fenotípica 71
8.1.2 Caracterización genética 71
8.2 Recomendaciones 72

Lista de figuras

Pág.

Figura 4-1: Mapa de la ciénaga de Zapatosa. Se muestran los municipios que rodean la CZ (Chiriguaná, Chimichagua, Curumaní, Tamalameque y el Banco) y los ríos Magdalena y Cesar. Fuente: OCHA - United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs, sf. 14

Figura 4-2. Caracteres taxonómicos clave para *Prochilodus magdalenae*. A. Escamas ásperas al tacto. **B.** Labio superior carnoso y delgado. **C.** Espina predorsal presente. Fuente: Adaptado de Maldonado et al., (2005). 17

Figura 4-3: Migración de *P. magdalenae* y caudal del Rio Magdalena. Se muestra los meses de migración de peces migratorios sobre la cuenca del Rio Magdalena en los dos ciclos hidrológicos. Fuente: Jiménez & López (2018).....18

Figura 5-1 Mapa de los sitios de muestreo. 1. Chiriguaná (CHIR) 2. Chimichagua-Conexión con el rio Cesar (CH-RC) 3. Chimichagua-Orilla de la CZ (CH-CZ) 4. Candelaria (CAN) 5. El Banco (BAN) 6. Tamalameque (TAM) 7. Pelaya (PEL) 8. La Gloria (GLO) 9. Gamarra (GAM).....30

Figura 5-2: Configuración con Landmarks (Puntos amarillos) y semilandmarks (Puntos rojos) en *Prochilodus magdalenae*. Landmarks: 1-comisura de la boca, 7-inicio de aleta dorsal, 8-inicio y 9-final de aleta adiposa, 10-punto de intercepción entre la línea lateral y aleta caudal, 11-inicio aleta anal, 12-inicio aleta pélvica, 18-inicio aleta pectoral y 19-ojo. Semilandmark: curvatura desde la comisura de la boca y el inicio de aleta dorsal demarcados con cinco semilandmarks, y una curvatura desde el inicio de la aleta pélvica y la comisura de la boca demarcados con cinco semilandmarks originada a partir de Makefan8 y TPSDig versión 2.31. 33

Figura 6-1. Prueba de Duncan entre medias de sitios de muestreo. A. Longitud total de *P. magdalenae.* B. Longitud estándar de *P. magdalenae.* Los promedios cubiertos por la misma barra no son significativamente diferentes. Chimichagua-Conexión con el rio Cesar (CHI-RC). Chimichagua-Orilla de la CZ (CH-CZ). Tamalameque (TAM). Pelaya (PEL). La Gloria (GLO). Gamarra (GAM).....41

Figura 6-2. Análisis de la función discriminante para machos y hembras de *P. magdalenae*. A. Validación cruzada de la función discriminante entre machos y hembras de *P. magdalenae* B. Diferencia de las formas entre machos y hembras de *P. magdalenae.* 42

Figura 6-3. Análisis de componentes principales para *P. magdalenae* entre los diferentes sitios de muestreo. La forma conceso es mostrada en color azul agua marina y el cambio de la forma por el componente 1 y 2 en color azul oscuro. 44

Figura 6-4. Análisis de variables canónicas para *P. magdalenae* entre los diferentes sitios de muestreo. La forma consenso es mostrada en color azul agua marina y el cambio de la forma por el eje canónico 1 y 2 en color azul oscuro. 46
Figura 6-5. Relación entre la distancia de Mahalanobis y distancia geográfica. 48
Figura 6-6. Análisis discriminante en la forma de *P. magdalenae* entre pares de sitios de muestreo. La forma conceso del primer sitio es mostrada en color azul oscuro y la forma consenso del segundo sitio en color azul agua marina. 49
Figura 6-7. Análisis de la función discriminante entre ecosistemas loticos y lenticos en los que habita *P. magdalenae*. A. Validación cruzada de la función discriminante B. Diferencia de las formas consenso de *P. magdalenae* según el ecosistema (lotico y lentico). 50
Figura 6-8. Electroferograma de la digestión enzimática del ADN del *P. magdalenae* con las enzimas de restricción PstI, ApeKI, EcoT22i. El pico inferior de 15pb (Verde) y superior de 1500 pb (Morado) fueron utilizados como estándar para calcular el tamaño de los otros fragmentos. 53
Figura 6-9. Análisis de componentes principales para *P. magdalenae* en los diferentes puntos de muestreo usando 6243 SNPs. Chimichagua orilla de la CZ (azul), Chimichagua conexión con Rio Cesar (café), Candelaria (amarillo), Tamalameque (morado), El Banco (rojo), La Gloria (verde), Gamarra (gris), Pelaya (negro), Chiriguaná (naranja). 55
Figura 6-10. Análisis de identidad por estado para *P. magdalenae* en los diferentes puntos de muestreo usando 6243 SNPs. Chimichagua-Orilla de la CZ (CH-CZ). Chimichagua-Conexión con el rio Cesar (CH-RC). Candelaria (CAN). El Banco (BAN). Tamalameque (TAM). La Gloria (GLO). Gamarra (GAM). Pelaya (PEL). Chiriguaná (CHIR). 56
Figura 6-11. Valores óptimos de K para 10 repeticiones según el método de Puechmaille para 6277 SNPs. La línea roja muestra el mejor K para cada uno de los estadísticos. 59
Figura 6-12. Representación de la estructura k=2 según el programa Clumpak para 6277 SNPs. Chimichagua-Conexión con el rio Cesar (CH-RC), Chimichagua-Orilla de la CZ (CH-CZ), Candelaria (CAN), Tamalameque (TAM), El Banco (BAN), La Gloria (GLO), Gamarra (GAM), Pelaya (PEL), Chiriguaná (CHIR). Grupo Genético 1 (Color azul) y grupo genético 2 (Color naranja). 60

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1-1: **Comparación de los marcadores moleculares usados en estudios de variabilidad genética de *Prochilodus magdalenae.*** 5

Tabla 4-1. Clasificación taxonómica del bocachico (*Prochilodus magdalenae*)...16

Tabla 4-2. Comparación de resultados de variabilidad genética reportados en estudios de *P. magdalenae.*.....21

Tabla 6-1. **Información descriptiva para ejemplares de *P. magdalenae* usados en variabilidad fenotípica.** Longitud estándar (LE), longitud total (LT), sin determinar (SD). 39

Tabla 6-2. **Análisis de varianza entre sitios de muestreo y entre machos y hembras de *P. magdalenae* para longitud estándar, longitud total y peso.**.....40

Tabla 6-3. **Distancia de Mahalanobis (M) y Procrustes (P) entre los sitios de muestreo para la especie *P. magdalenae.*** Subrayado se encuentran los sitios con menor diferenciación morfológica, y con negrilla los sitios entre los que existe mayor diferenciación morfológica. 47

Tabla 6-4. **Estimación de la concentración e integridad del ADN obtenido a partir de *P. magdalenae.*** 52

Tabla 6-5. **Parámetros poblacionales de *P. magdalenae* en cada uno de los sitios de muestreo para 6277 SNPs.** Heterocigosidad esperada (He), Heterocigosidad observada (Ho), índice de endogamia (F_{IS}). Chimichagua-Conexión con el rio Cesar (CH-RC), Chimichagua-Orilla de la CZ (CH-CZ), Candelaria (CAN), Tamalameque (TAM), El Banco (BAN), La Gloria (GLO), Gamarra (GAM), Pelaya (PEL), Chiriguaná (CHIR). En negrilla se resaltan los F_{IS} estadísticamente significativos (p-valor 0.05).....58

Tabla 6-6. **Análisis de varianza molecular para *P. magdalenae* en los sitios de muestreo para 6277 SNPs.**.....60

Lista de Símbolos y abreviaturas

A	Adenina
AD	Análisis discriminante
ADN	Ácido desoxirribonucleico
AFLP	Amplified fragment length polymorphism/Polimorfismos en la longitud de fragmentos amplificados
AMC	Altura máxima del cuerpo
ANOVA	Analysis of Variance/Análisis de varianza
AMOVA	Analysis of molecular variance/Análisis de varianza molecular
BAN	El Banco
C	Citosina
CAN	Candelaria
CHIR	Chiriguaná
CS	Centroid size/Tamaño del centroide
CVA	Canonical variate analysis/ Análisis de variables canónicas
CZ	Ciénaga de Zapatosa
CH-CZ	Chimichagua-Conexión con la Ciénaga de Zapatosa
CH-RC	Chimichagua-Conexión con el Rio Cesar
F_{IS}	Índice de endogamia
F_{IT}	Índice de fijación en la metapoblación
F_{ST}	Índice de fijación
EDTA	Ácido etilendiaminotetraacético
ER	Enzima de restricción
G	Guanina
GAM	Gamarra
GBS	Genotyping by sequencing/ Genotipificación por secuenciación
GLO	La Gloria

HCl	Ácido clorhídrico
He	Heterocigosidad esperada
Ho	Heterocigosidad observada
H-W	Hardy-Weinberg
IBS	Identity by state/ Identidad por estado
IMP	Integrated Morphometrics Package/ Paquete integrado de morfometría
LE	Longitud estándar
LT	Longitud total
MANOVA	Multivariate analysis of variance/Análisis multivariado de varianza
MCMC	Markov chain Monte Carlo/Cadenas de Markov Monte Carlo
MG	Morfometría geométrica
MT	Morfometría tradicional
NaCl	Cloruro de sodio
NGS	Next Generation Sequencing/ Secuenciación de nueva generación
Nm	Número de migrantes
PCA	Principal component analysis/ Análisis de componentes principales
PCR	Polymerase Chain Reaction/Reacción en Cadena de la Polimerasa
PEL	Pelaya
RAMs	Random amplified microsatellites/Microsatélites amplificados al azar
RAPD	Random amplified polymorphic DNA/ Amplificación aleatoria de ADN polimórfico
RFLP	Restriction Fragment Length Polymorphism/ Polimorfismos de longitud de fragmentos de restricción
SAS	Statistical Analysis Software/Software de análisis estadístico
SD	Sin determinar
SDS	Sodium Dodecyl Sulfate/Dodecilsulfato sódico
SNP	Single Nucleotide Polymorphism/ Polimorfismo de nucleótido simple
SSCP	Single Stranded Conformational Polymorphism/Polimorfismos de conformación de cadena simple
SSR	Simple sequence repeat/Secuencia de repetición simple
STR	Short tandem repeat/Repeticiones cortas en tándem

T	Timina
TAM	Tamalameque
TE	Tris-EDTA
TMM	Talla media de madurez

Bibliografía

Abdul, P. M. (2014). Application of microsatellite markers in conservation genetics and fisheries management: recent advances in population structure analysis and conservation strategies. *Genetics Research International, 2014*, 1-11.

Ackiss, A. S., Dang, B. T., Bird, C. E., Biesack, E. E., Chheng, P., Phounvisouk, L., … Carpenter, K. E. (2019). Cryptic lineages and a population dammed to incipient extinction? insights into the genetic structure of a mekong river catfish. *Journal of Heredity*. Recuperado de https://doi.org/10.1093/jhered/esz016

Adams, D., Rohlf, F., & Slice, D. (2004). Geometric morphometrics: ten years of progress following the 'revolution'. *Italian Journal of Zoology, 1*(5), 5-16.

Adams, D., Rohlf, J., & Slice, D. (2013). A field comes of age: *geometric morphometrics in the 21st century, 24*(1), 7-14.

Adamson, E. A. S., Hurwood, D. A., & Mather, P. B. (2012). Insights into historical drainage evolution based on the phylogeography of the chevron snakehead fish (*Channa striata*) in the Mekong Basin. *Freshwater Biology, 57*(11), 2211-2229.

Aguirre, J., Narváez, J., & Castro, L. (2013). Mitochondrial DNA variation of the bocachico *Prochilodus magdalenae* (Characiformes, Prochilodontidae) in the Magdalena River Basin, Colombia. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 23*, 594-605.

Aguirre, W., & Jiménez, P. (2018). Guía práctica de Morfometría Geométrica. Aplicaciones en la ictiología. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/327248793_Morfometria_Geometrica_WA-PJJP/download

Alarcón, I., Castillo, M. A., Figueroa, G., Arroyo, J., & Barriga, I. de los Á. (2017). Diversidad morfológica en 6 poblaciones del pescado blanco *Chirostoma humboldtianum*. *Revista mexicana de biodiversidad, 88*(1), 207-214.

Alonso, J. C., Escobar, F. D., Polo, C. J., & Puentes, V. (2014). Aguas Continentales. En V. Puentes, F. D. Escobar, C. J. Polo, & J. C. Alonso (Eds.), Estado de los Principales Recursos Pesqueros de Colombia 2014 (Serie recu, pp. 179– 180). Recuperado de http://aunap.gov.co/wp-content/uploads/2016/05/ESTADO-DE-PRINCIPALES-RECURSOS-PESQUEROS-EN-COLOMBIA-2014-version-digital.pdf

Arango, G. A. (2001). Algunos aspectos biológico pesqueros de cuatro especies ícticas en la ciénaga de Tumaradó. (tesis de pregrado). Universidad de Antioquia. Medellín (Antioquia), Colombia.

Aranguren, J. A., Román, R., Isea, W., Villasmil, Y., & Jordana, J. (2005). Los microsatélites (STR's), marcadores moleculares de ADN por excelencia para programas de conservación: Una revisión. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal, 13*, 30-42.

Arias, M., Jiménez, L. F., & Dorado, M. del P. (2010). Desarrollo larval de *Prochilodus magdalenae* (Steindachner, 1879) (Pisces: Prochilodontidae), río Magdalena, Colombia. *Actualidades Biológicas, 32*(93), 199-208.

Askari, G., Shabani, A., & Kolangi, H. (2013). Application of molecular markers in fisheries and aquaculture. *Scientific Journal of Animal Science, 2*(4), 82-88.

Astorga, M. P. (2008). Estado actual del uso de marcadores moleculares en moluscos bivalvos de importancia para la acuicultura. Recuperado de http://www.fao.org/3/a-i0444s/i0444s23.pdf.

Baetscher, D. S., Hasselman, D. J., Reid, K., Palkovacs, E. P., & Garza, J. C. (2017). Discovery and characterization of single nucleotide polymorphisms in two anadromous alosine fishes of conservation concern. *Ecology and Evolution, 7*(17), 6638-6648.

Barbará, T., Palma, C., Paggi, G. M., Bered, F., Fay, M., & Lexer, C. (2007). Cross-species transfer of nuclear microsatellite markers: potential and limitations. *Molecular Ecology, 16*(18), 3759-3767.

Barbosa, A. C. D. R., Corrêa, T. C., Galzerani, F., Galetti, P. M., & Hatanaka, T. (2006). Thirteen polymorphic microsatellite loci in the Neotropical fish *Prochilodus argenteus* (Characiformes, Prochilodontidae). *Molecular Ecology Notes, 6*(3), 936-938.

Barbosa, A. C. D. R., Galzerani, F., Corrêa, T., Galetti, P. M., & Hatanaka, T. (2008). Description of novel microsatellite loci in the Neotropical fish Prochilodus argenteus and cross-amplification in *P. costatus and P. lineatus*. *Genetics and Molecular Biology, 31*(1, Suppl.), 357-360. Recuperado de http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-47572008000200032&nrm=iso

Bardakci, F., & Skibinski, D. F. (1994). Application of the RAPD technique in tilapia fish: species and subspecies identification. *Heredity, 73*(Pt 2), 117-123.

Barreto, C. G., & Borda, C. A. (2008). Propuesta técnica para la definición de cuotas globales de pesca para Colombia, vigencia 2009. (S. E. Muñoz, V. Puentes, & A. I. Sanabria, Eds.), Propuesta técnica para la definición de cuotas globales de pesca para Colombia, vigencia 2009. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Vladimir_Puentes_Granada/publication/328926171_PROPUESTA_TECNICA_PARA_LA_DEFINICION_DE_CUOTAS_GLOBALES_DE_PESCA_PARA_COLOMBIA_VIGENCIA_2009/links/5beb86d592851c6b27bd0f3a/PROPUESTA-TECNICA-PARA-LA-DEFINICION-DE-CUOTAS-

Barreto, C. G., Borda, C. A., Bustamante, C., Guillot, L., Sánchez, C. L., & Maldonado, L. F. (2010). Cuenca del Río Magdalena. Documento Técnico concertado en el Comité Técnico Interinstitucional. Ministerio Propuesta Técnica para la definición de Cuotas Globales de Pesca para Colombia, Vigencia 2011. Recuperado de

http://cpps.dyndns.info/cpps-docs-web/planaccion/biblioteca/pordinario/Colombia/Docs INCODER/Doc Técnico Cuotas 2011.pdf

Barroso, R. M., Hilsdorf, A. W. S., Moreira, H. L. M., Mello, A. M., Guimarães, S. E. F., Cabello, P. H., & Traub-Cseko, Y. M. (2003). Identification and characterization of microsatellites loci in *Brycon opalinus* (Cuvier, 1819) (Characiforme, Characidae, Bryconiae). *Molecular Ecology Notes, 3*(2), 297-298.

Basiita, R. K., Zenger, K. R., Mwanja, M. T., & Jerry, D. R. (2018). Gene flow and genetic structure in Nile perch, *Lates niloticus*, from African freshwater rivers and lakes. *PloS one, 13*(7), e0200001.

Bradbury, I. R., Wringe, B. F., Watson, B., Paterson, I., Horne, J., Beiko, R., … Bentzen, P. (2018). Genotyping-by-sequencing of genome-wide microsatellite loci reveals fine-scale harvest composition in a coastal Atlantic salmon fishery. *Evolutionary Applications, 11*, 918–930.

Bradbury, P., Zhang, Z., Kroon, D., Casstevens, T., Ramdoss, Y., & Buckler, E. (2007). TASSEL: Software for association mapping of complex traits in diverse samples. *Bioinformatics, 23*(19), 2633-2635.

Caillon, F., Bonhomme, V., Möllmann, C., & Frelat, R. (2018). A morphometric dive into fish diversity. *Ecosphere, 9*(5), e02220.

Calcagnotto, D., Russello, M., & DeSalle, R. (2001). Isolation and characterization of microsatellite loci in *Piaractus mesopotamicus* and their applicability in other Serrasalminae fish. *Molecular Ecology Notes, 1*(4), 245-247.

Cargill, M., Altshuler, D., Ireland, J., Sklar, P., Ardlie, K., Patil, N., … Lander, E. S. (1999). Characterization of single-nucleotide polymorphisms in coding regions of human genes. *Nature Genetics, 22*(3), 231-238.

Carreras, C., Ordóñez, V., Zane, L., Kruschel, C., Nasto, I., Macpherson, E., & Pascual, M. (2017). Population genomics of an endemic Mediterranean fish: differentiation by fine scale dispersal and adaptation. *Scientific Reports, 7*, 43417.

Carvalho, L. F., Hatanaka, T., & Galetti, P. M. (2008). Evidence of lack of population substructuring in the Brazilian freshwater fish *Prochilodus costatus. Genetics and Molecular Biology, 31*(1 (suppl)), 377-380.

Charlin, J., & Hernández, M. (2016). Morfometría geométrica y representaciones rupestres: explorando las aplicaciones de los métodos basados en landmarks. *Arqueologia, 22*(1), 103-125.

Chen, X., Wang, J. J., Ai, W. M., Chen, H., & Lin, H. D. (2018). Phylogeography and genetic population structure of the spadenose shark (*Scoliodon macrorhynchos*) from the Chinese coast. *Mitochondrial DNA A DNA Mapp Seq Anal., 29*(7), 1100-1107.

Collyer, M., Stockwell, C., Adams, D., & Hildegard, M. (2007). Phenotypic Plasticity and Contemporary Evolution in Introduced Populations: Evidence from Translocated Populations of White Sands Pupfish (*Cyrpinodon tularosa). Ecology Research, 22*(6), 902-910.

Conover, D. O., Clarke, L. M., Munch, S. B., & Wagner, G. N. (2006). Spatial and temporal scales of adaptive divergence in marine fishes and the implications for conservation. *Journal of Fish Biology, 69*(sc), 21-47.

Contreras, I. A. E. (2019). Influencia de las condiciones antrópicas sobre la reproducción en hembras de *Prochilodus magdalenae* (steindachner, 1879) en el complejo cenagoso de la Zapatosa (tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia.

Cuartas, D. M. (2008). Caracterización genética de *Prochilodus magdalenae* (Pisces: Prochilodontidae), en la cuenca del río San Jorge, utilizando marcadores microsatélites (tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

Defaveri, J., Viitaniemi, H., Leder, E., & Merilä, J. (2013). Characterizing genic and nongenic molecular markers: Comparison of microsatellites and SNPs. *Molecular ecology resources, 13*, 377-392.

DeWoody, J. A., & Avise, J. C. (2000). Microsatellite variation in marine, freshwater and anadromous fishes compared with other animals. *Journal of Fish Biology, 56*(3), 461-473.

De la Hoz, J. L., & Manjarré, L. (2018). Parámetros biológico-pesqueros obtenidos a partir de la información colectada en las diferentes cuencas y litorales del país durante el período julio-diciembre de 2018. Recuperado de http://sepec.aunap.gov.co/Home/VerPdf/60

Dudu, A., Georgescu, S., & Costache, M. (2015). Evaluation of Genetic Diversity in Fish Using Molecular Markers (pp. 163-193). Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/275038486_Evaluation_of_Genetic_Diversity_in_Fish_Using_Molecular_Markers

Duncan, D. B. (1955). Multiple range and multiple F tests. *Biometrics*, *11*, 1-42.

Elmer, K., Kusche, H., Lehtonen, T., & Meyer, A. (2010). Local variation and parallel evolution: morphological and genetic diversity across a species complex of neotropical crater lake cichlid fishes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 365*, 1763-1782.

Elshire, R. J., Glaubitz, J. C., Sun, Q., Poland, J. A., Kawamoto, K., Buckler, E. S., & Mitchell, S. E. (2011). A robust, simple genotyping-by-sequencing (GBS) approach for high diversity species. The original description of the GBS method. *PloS one, 6*(5), e19379.

Endler, J. A. (1995). Multiple-trait coevolution and environmental gradients in guppies. *Trends in Ecology & Evolution, 10*(1), 22-29.

Excoffier, L., & Lischer, H. E. (2010). Arlequin suite ver 3.5: A new series of programs to perform population genetics analyses under Linux and Windows. *Molecular Ecology Resources, 10*(3), 564-567.

Escanta, R., & Jiménez, P. (2019). Uso de la morfometría geométrica para establecer contrastes biológicos y ambientales en poblaciones de peces del Río Teaone. *Revista cientifica hallazgos, 4*(1), 55-69.

FAO/PNUMA. (1984). Conservación de los recursos genéticos de los peces: problemas y recomendaciones. Informe de la consulta de expertos sobre los recursos genéticos de los peces. Recuperado de http://www.fao.org/docrep/005/AD013S/AD013S00.HTM#TOC

FAO. (2015). Colombia: La pesca en cifras 2014. Recuperado de http://aunap.gov.co/wp-content/uploads/2016/05/Pesca_en_cifras.pdf

FAO. (2016). El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2016. Contribución a la seguridad alimentaria y la nutrición para todos. Roma. Recuperado de http://www.fao.org/3/a-i5555s.pdf

Fernández, M. E., Goszczynski, D. E., Lirón, J. P., Villegas, E. E., Carino, M. H., Ripoli, M. V, … Giovambattista, G. (2013). Comparison of the effectiveness of microsatellites and SNP panels for genetic identification, traceability and assessment of parentage in an inbred Angus herd. *Genetics and molecular biology, 36*(2), 185-191.

Ferreira, D. G., Souza, L., Shibatta, O. A., Sofia, S. H., Carlsson, J., Dias, J. H., … Makrakis, M. C. (2016). Genetic structure and diversity of migratory freshwater fish in a fragmented Neotropical river system. *Reviews in Fish Biology and Fisheries, 27*(1), 209-231.

Firas, R., & Abdulkareem, A. (2015). Applications of Molecular Markers in Animal Breeding: A review. *American Journal of Applied Scientific Research, 1*(1), 1-5.

Fischer, M., Rellstab, C., Leuzinger, M., Roumet, M., Gugerli, F., Shimizu, K., … Widmer, A. (2017). Estimating genomic diversity and population differentiation – an empirical comparison of microsatellite and SNP variation in *Arabidopsis halleri*. *BMC Genomics, 18*(1), 69.

Flórez, F. (1986). Observaciones ecológicas sobre los peces bocachico real (*Prochilodus mariae* eigenmann 1922) y el bocachico cardumero (*Suprasinelepichthys laticeps* valenciennes 1849) del sistema del rio metica y algunos datos comparativos del bocachico *(Prochilodus reticulatus). Acta Biológica Colombiana, 1*(2), 9-33.

Fordyce, J. A. (2006). Review The evolutionary consequences of ecological interactions mediated through phenotypic plasticity. *The Journal of Experimental Biology, 209*, 2377-2383.

Foster, K., Bower, L., & Piller, K. (2015). Getting in shape: habitat-based morphological divergence for two sympatric fishes. *Biological Journal of the Linnean Society, 114*(1), 152-162.

Freeland, J., Kirk, H., & Petersen, S. (2011). Molecular Ecology. Recuperado de https://moodle2.units.it/pluginfile.php/161071/mod_resource/content/0/Molecular Ecology_Freeland.pdf

Galindo, B. A., Ferreira, D. G., Apolinário, C., Terra, M. C., Aprígio, G. O., Ota, R. R., … Sofia, S. H. (2019). Genetic diversity and population structure of *Brycon nattereri*

(Characiformes: Bryconidae): a Neotropical fish under threat of extinction. *Neotropical Ichthyology, 17*(1), e180071.

Galvis, G., López, Y., & Gutiérrez, M. (2013). Peces del complejo cenagoso de Zapatosa, Mata de Palma y la Pachita. En J. Rangel (Ed.), Colombia diversidad biótica XIII. Complejo cenagoso Zapatosa y ciénagas del Sur del Cesar (pp. 525-557). Recuperado de http://www.uneditorial.net/pdf/TomoXIII.pdf

Glaubitz, J. C., Casstevens, T. M., Lu, F., Harriman, J., Elshire, R. J., Sun, Q., & Buckler, E. S. (2014). TASSEL-GBS: A High Capacity Genotyping by Sequencing Analysis Pipeline. *PloS one, 9*(2), e90346.

Godoy, J. A. (2009). La genética, los marcadores moleculares y la conservación de especies. *Ecosistemas, 18*(1), 23-33.

Gomes, D., Souza, L., Shibatta, O., Sofia, S. H., Carlsson, J., Pinheiro, João Henrique Makrakis, D. S., & Cavicchioli, M. (2016). Genetic structure and diversity of migratory freshwater fish in a fragmented Neotropical river system. *Reviews in Fish Biology and Fisheries, 27*(1), 209-231.

González, E. (2003). Microsatélites: Sus aplicaciones en la conservación de la biodiversidad. *Graellsia, 59*(2-3), 377-388.

Hatanaka, T., Henrique, F., & Galetti, P. (2006). Population substructuring in a migratory freshwater fish *Prochilodus argenteus* (Characiformes, Prochilodontidae) from the São Francisco River. *Genetica, 126*(1-2), 153-159.

Helyar, S. J., Hemmer, J., Bekkevold, D., Taylor, M. I., Ogden, R., Limborg, M. T., … Nielsen, E. E. (2011). Application of SNPs for population genetics of nonmodel organisms: new opportunities and challenges. Molecular Ecology Resources, 11(s1), 123-136.

Hemmer, J., Nielsen, E., Frydenberg, J., & Loeschcke1, V. (2007). Adaptive divergence in a high gene flow environment: Hsc70 variation in the European flounder (*Platichthys flesus L.*). *Heredity, 99*(6), 592–600.

Hernández, D., Navarro, O., & Muñoz, J. (2017). Diversidad genética del bocachico *Prochilodus magdalenae* en el departamento de Sucre. *Revista colombiana de ciencia animal, 9*(supl), 99-106.

James Rohlf, F., & Marcus, L. F. (1993). A revolution morphometrics. *Trends in Ecology & Evolution, 8*(4), 129-132.

Jaramillo, U., & Jiménez, L. F. (2008). Algunos aspectos biológicos de la población de *Prochilodus magdalenae* en las ciénagas de Tumaradó (Río Atrato), Colombia. *Actualidades Biológicas, 30*(88), 55-66.

Jiang, Z., Wang, H., Michal, J., Zhou, X., Liu, B., Woods, L., & Fuchs, R. (2016). Genome wide sampling sequencing for SNP genotyping: Methods, challenges and future development. *International Journal of Biological Sciences, 12*(1), 100-108.

Jiménez, L. F, & López, S. (2018). Cortocircuitos dentro de la red fluvial: Impactos de los embalses sobre las poblaciones de peces en los Andes. En L. A. Moreno, C. Rueda, & G. I. Andrade (Eds.), Biodiversidad 2017. Estado y tendencias de la biodiversidad continental de Colombia. Bogotá, D. C., Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Jiménez, L F, Palacio, J., & Leite, R. (2010). River flooding and reproduction of migratory fish species in the Magdalena River basin, Colombia. *Ecology of Freshwater Fish, 19*(2), 178-186.

Jiménez, Luz Fernanda, Restrepo, D., López, S., Delgado, J., Valderrama, M., Álvarez, J., & Gómez, D. (2014). Ictiofauna y desarrollo del sector hidroeléctrico en la cuenca del río Magdalena-Cauca, Colombia. *Biota Colombiana, 15*(2), 3-25.

Johnson, J. (2002). Small male mating advantage and reversed size dimorphism in poeciliid fishes. *Oikos, 96*, 82–91.

Jorgensen, H., Hansen, M., Bekkevold, D., Ruzzante, D., & Loeschcke, V. (2005). Marine landscapes and population genetic structure of herring (*Clupea harengus L.*) in the Baltic Sea. *Molecular Ecology, 14*(10), 3219-3234.

Julio, Y. P. (2013). Evaluación de las relaciones y diferencias genéticas del bocachico *Prochilodus magdalenae* (Characiformes, Prochilodontidae) asociados a dos rutas migratorias en la parte baja de la cuenca del río Magdalena-Colombia (Tesis de pregrado). Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia.

Kenchington, E. (1999). Chapter 4 The Effects of Fishing on Species and Genetic Diversity (pp. 235-253). Recuperado de http://www.fao.org/tempref/FI/DOCUMENT/reykjavik/pdf/14Kenchington_v6_final.pdf

Kendall, D. G. (1977). The Diffusion of Shape. Applied Probability Trust (Vol. 9).

Klingenberg, C. (2011). MorphoJ: an integrated software package for geometric morphometrics. *Molecular Ecology Resources, 11*(2), 353-357.

Kopelman, N. M., Mayzel, J., Jakobsson, M., Rosenberg, N. A., & Mayrose, I. (2015). Clumpak: a program for identifying clustering modes and packaging population structure inferences across K. *Molecular Ecology Resources, 15*(5), 1179-1191.

Langerhans, R., & DeWitt, T. (2004). Shared and unique features of evolutionary diversification. *The American Naturalist, 164*(3), 335-349.

Lasso, C., & Morales, M. A. (2011). Catálogo de los recursos pesqueros continentals de Colombia: memoria técnica y explicativa, resumen ejecutivo. Recuperado de http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/31378

Lemopoulos, A., Prokkola, J. M., Uusi, S., Vasemägi, A., Huusko, A., Hyvärinen, P., … Vainikka, A. (2019). Comparing RADseq and microsatellites for estimating genetic diversity and relatedness — Implications for brown trout conservation. *Ecology and Evolution, 9*(4), 2106-2120.

Li, C., Waldbieser, G., Bosworth, B., Beck, B. H., Thongda, W., & Peatman, E. (2014). SNP discovery in wild and domesticated populations of blue catfish, Ictalurus furcatus,

using genotyping-by-sequencing and subsequent SNP validation. *Molecular Ecology Resources, 14*(6), 1261-1270.

Li, Y.-L., & Liu, J.-X. (2017). StructureSelector: A web-based software to select and visualize the optimal number of clusters using multiple methods. *Molecular Ecology Resources, 18*(1), 176-177.

Lischer, H., & Excoffier, L. (2012). PGDSpider: an automated data conversion tool for connecting population genetics and genomics programs. *Bioinformatics, 28*(2), 298-299.

Liu, Z. (2008). Sigle nucleotide polymorphism (SNP). En J. Wiley & Sons (Eds.), Aquaculture Genome Technologies (pp. 59-72). Recuperado de https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=4lJIVRkfrVMC&oi=fnd&pg=PA59&dq=single+nucleotide+polymorphisms+snps&ots=aYNM7AbGOr&sig=ZYZoWWdj47IVaHD6mXjS4d1yo98#v=onepage&q=single nucleotide polymorphisms snps&f=false.

Liu, Z., & Cordes, J. (2004). DNA marker technologies and their applications in aquaculture genetics. *Aquaculture, 238*(1-4), 1-37.

Lópera, N., Ribeiro, R., Povh, J., & Gomes, P. (2008). Caracterización genética de lotes de peces usados en programas de repoblamiento y su importancia en la conservación genética en la piscicultura. *Zootecnia Tropical, 26*(4), 515-522.

López, S., Jiménez, L. F., Agostinho, A. A., & Pérez, C. M. (2016). Potamodromous migrations in the Magdalena River basin: bimodal reproductive patterns in neotropical rivers. *Journal of Fish Biology, 89*, 157-171.

Lu, F., Lipka, A., Glaubitz, J., Elshire, R., Cherney, J., Casler, M., … Costich, D. (2013). Switchgrass genomic diversity, ploidy, and evolution: novel insights from a network-based SNP discovery protocol. *PLoS Genetic, 9*(1), e1003215.

Maldonado, J. A., Ortega, A., Usma, J. S., Galvis, G., Villa, F. A., Vásquez, L., … Ardila, C. (2005). Peces de los Andes de Colombia. Recuperado de http://awsassets.panda.org/downloads/peces_de_los_andes_de_colombia.pdf.

Mancera, N., Márquez, E., & Hurtado, J. (2013). Uso de Citogenética y Técnicas Moleculares en Estudios de Diversidad Genética en Peces Colombianos. En A. Herrera, Á. M. Ortega, C. E. Ortíz, E. J. Márquez, J. E. Suescun, J. Zamora, … X. Lopera (Eds.), Biología molecular aplicada a la producción animal y conservación de especies silvestres (pp. 237-312).

Marrugo, J., Benitez, L., & Olivero, J. (2008). Distribution of mercury in several environmental compartments in an aquatic ecosystem impacted by gold mining in northern Colombia. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 55*(2), 305-316.

Matsumoto, C. K., & Hilsdorf, A. W. S. (2009). Microsatellite variation and population genetic structure of a neotropical endangered Bryconinae species *Brycon insignis* Steindachner, 1877: implications for its conservation and sustainable management. *Neotropical Ichthyology, 7*(3), 395-402.

Metzker, M. (2010). Sequencing technologies — the next generation. *Nature Reviews Genetics, 11*(1), 31-46.

Moen, T., Hayes, B., Nilsen, F., Delghandi, M., Fjalestad, K. T., Fevolden, S. E., … Lien, S. (2008). Identification and characterisation of novel SNP markers in Atlantic cod: Evidence for directional selection. *BMC Genetics, 9*(1), 18.

Mojekwu, T. O., & Anumudu, C. I. (2013). Microsatellite markers in Aquaculture: Application in Fish population genetics. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology, 5*(4), 43-48.

Mojica, J. I., Usma, J. S., Álvarez, R., & Lasso, C. (Eds.). (2012). Libro rojo de peces dulceacuícolas de Colombia 2012. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, WWF Colombia y Universidad de Manizales.

Mojica, J. I., Valderrama, M., Barreto, C., & Álvarez, R. (2012). *Prochilodus magdalenae*. En J. Mojica, J. Usma, R. Álvarez, & C. Lasso (Eds.), Libro rojo de peces dulceacuícolas de Colombia 2012 (1.a ed., pp. 154-159). Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, WWF Colombia y Universidad de Manizales.

Morelli, K. A., Revaldaves, E., Oliveira, C., & Foresti, F. (2007). Isolation and characterization of eight microsatellite loci in *Leporinus macrocephalus* (Characiformes: Anostomidae) and cross-species amplification. *Molecular Ecology Notes, 7*(1), 32-34.

Moreno, R. Á. (2007). Plasticidad fenotípica: Algunas implicaciones en la conservación de la biodiversidad. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/258344017_Plasticidad_fenotipica_algunas_implicaciones_en_la_conservacion_de_la_biodiversidad

Morin, P. A., Luikart, G., Wayne, R. K., & the SNP workshop group. (2004). SNPs in ecology, evolution and conservation. *Trends in Ecology and Evolution, 19*(4), 208-216.

Morin, P., Archer, F., L Pease Victoria, Hancock-Hanser, B., Robertson, K., Huebinger, R., … L Taylor, B. (2012). An empirical comparison of single nucleotide polymorphisms and microsatellites for population and demographic analyses of bowhead whales. Recuperado de https://swfsc.noaa.gov/publications/CR/2012/2012Morin1.pdf

Murray, K., & Borevitz, J. (2018). Axe: rapid, competitive sequence read demultiplexing using a trie. *Bioinformatics, 34*(22), 3924-3925.

Narváez, J. (2012). Primer programa de genética de la conservación para peces en Colombia. Recuperado de http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama11/CT 2010/1891517549.pdf

New England Biolabs. (2017). Optimizing restriction endonuclease reactions. Recuperado de https://www.neb.com/protocols/2012/12/07/optimizing-restriction-endonuclease-reactions

Nunez, J. C. B., Seale, T. P., Fraser, M. A., Burton, T. L., Fortson, T. N., Hoover, D., … Crawford, D. L. (2015). Population Genomics of the Euryhaline Teleost *Poecilia latipinna*. *PloS one, 10*(9), e0137077.

O'Reilly, K. M., & Horn, M. H. (2004). Phenotypic variation among populations of *Atherinops affinis* (Atherinopsidae) with insights from a geometric morphometric analysis. *Journal of Fish Biology, 64*(4), 1117-1135.

Orozco, G., & Narvaez, J. C. (2014). Genetic diversity and population structure of bocachico *Prochilodus magdalenae* (Pisces, Prochilodontidae) in the Magdalena River basin and its tributaries, Colombia. *Genetics and Molecular Biology, 37*(1), 37-45.

Piorski, N. M., Sanches, A., Carvalho, L. F., Hatanaka, T., Carrillo, M., Freitas, P. D., & Galetti, P. M. (2008). Contribution of conservation genetics in assessing neotropical freshwater fish biodiversity. *Brazilian Journal of Biology, 68*(4 Suppl), 1039-1050.

Polanco, P., Berdugo, G., & Narváez, J. (2018). Diversidad y estructura genética del *Prochilodus magdalenae* (Pisces: Prochilodontidae) aguas arriba y abajo de la represa Betania, Colombia. *Intropica, 13*(2), 87 - 10.

Povh, J., Lopera, N., Ribeiro, R., Lupchinski, E., Gomes, P., & Lopes, T. (2008). Monitoreo genético en programas de repoblamiento de peces mediante marcadores moleculares. *Ciencia e investigación agraria, 35*(1), 5-15.

Pritchard, J., Stephens, M., & Donnelly, P. (2000). Inference of population structure using multilocus genotype data. *Genetics, 155*(2), 945-959.

Puechmaille, S. (2016). The program structure does not reliably recover the correct population structure when sampling is uneven: subsampling and new estimators alleviate the problem. *Molecular Ecology Resources, 16*, 608–627.

Putman, A. I., & Carbone, I. (2014). Challenges in analysis and interpretation of microsatellite data for population genetic studies. *Ecology and Evolution, 4*(22), 4399-4428.

Rangel, J., Jaramillo, A., Parra, N., Rivera, O., Rocha, M., Alvarez, J., … Ardila, M. (2012). Colombia Diversidad Biótica. Publicación Especial No. 7. Las ciénagas del departamento del Cesar: Zapatosa y cinénagas del sur-biodiversidad y conservación. (J. Rangel, Ed.) (Primera). Bogotá. Recuperado de https://www.academia.edu/5911075/Las_ciénagas_del_departamento_del_Cesar_Zapatosa_y_Ciénagas_del_Sur-Biodiversidad_y_Conservación

Ribolli, J., Rodrigues de Melo, C. M., & Zaniboni, E. (2012). Genetic characterization of the Neotropical catfish *Pimelodus maculatus* (Pimelodidae, Siluriformes) in the Upper Uruguay River. *Genetics and Molecular Biology, 35*(4), 761-769.

Robinson, B. W., & Wilson, D. S. (1994). Character Release and Displacement in Fishes: A Neglected Literature. *The American Naturalist, 144*(4), 596-627.

Rohlf, F. (2017). TPSRelw. State University of New York, Stony Brook: Department of Ecology and Evolution. Recuperado de https://life.bio.sunysb.edu/morph/

Rohlf, F. (2018a). TPSDig2. State University of New York, Stony Brook: Department of Ecology and Evolution. Recuperado de http://life.bio.sunysb.edu/morph/

Rohlf, F. (2018b). TPSUtil. State University of New York, Stony Brook: Department of Ecology and Evolution. Recuperado de http://life.bio.sunysb.edu/morph/

Rohlf, J., & Marcus, L. (1993). A revolution morphometrics. Trends in Ecology and Evolution, 8(4), 129-132.

Román, C. (1993). Ciclo biológico del bocachico Prochilodus magdaelenae (Steindachner 1879) (Pisces: Prochilodontidae) en la cuenca del río Atrato, Colombia. *Brenesia, 39*(40), 59-70.

Rousset, F. (2008). genepop'007: a complete re-implementation of the genepop software for Windows and Linux. *Molecular Ecology Resources, 8*(1), 103-106.

Rueda, EC, Carriquiriborde, P., Monzón, A., Somoza, G., & Ortí, G. (2013). Seasonal variation in genetic population structure of sábalo (Prochilodus lineatus) in the Lower Uruguay River. *Genetica, 141*(7-9), 401-407.

Rueda, Eva, Sommer, J., Scarabotti, P., Markariani, R., & Orti, G. (2011). Isolation and characterization of polymorphic microsatellite loci in the migratory freshwater fish *Prochilodus lineatus* (Characiformes: Prochilodontidae) Isolation and characterization of polymorphic microsatellite loci in the migratory freshwater fish Pr. *Conservation Genetics Resources, 3*, 681-684.

Sanches, A., Galetti Jr., P. M., Galzerani, F., Derazo, J., Cutilak-Bianchi, B., & Hatanaka, T. (2012). Genetic population structure of two migratory freshwater fish species (Brycon orthotaenia and Prochilodus argenteus) from the São Francisco River in Brazil and its significance for conservation. Latin american journal of aquatic research, 40, 177-186. Recuperado de https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-560X2012000100017&nrm=iso

Sanches, A., & Galetti, P. M. (2012). Population genetic structure revealed by a school of the freshwater migratory fish, *Brycon hilarii. Latin American Journal of Aquatic Research, 40*(2), 408-417.

Santacruz, D. (2003). Evaluación de la variabilidad genética con marcadores microsatélites del bocachico, *Prochilodus magdalenae* (Steindachner 1878), en el río Sinú, Colombia (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

Santos, M. C. F., Ruffino, M. L., & Farias, I. P. (2007). High levels of genetic variability and panmixia of the tambaqui *Colossoma macropomum* (Cuvier, 1816) in the main channel of the Amazon River. *Journal of Fish Biology, 71*, 33-44.

SAS Institute Inc. (2018). SAS university edition software. Recuperado de https://www.sas.com/en_us/software/university-edition/download-software.html#windows-setup

Scott, L., & Johnson, J. (2010). Does sympatry predict life history and morphological diversification in the Mexican livebearing fish *Poeciliopsis baenschi*? *Biological Journal of the Linnean Society, 100*(3), 608-618.

Senan, S., Kizhakayil, D., Sasikumar, B., & Sheeja, T. E. (2014). Methods for Development of Microsatellite Markers: An Overview. *Notulae Scientia Biologicae, 6*(1), 1-13.

Sheets, H. (2001). IMP. Integrated Morphometric Package. Recuperado de http://www.canisius/~sheets/morphsoft.html

Sheets, H. (2014a). CoorGen8. Canisius College: Department of Physics. Recuperado de http://www3.canisius.edu/~sheets/IMP 8.html.

Sheets, H. (2014b). CVAGen8. Canisius College: Department of Physics. Recuperado de http://www3.canisius.edu/~sheets/IMP 8.html.

Sheets, H. (2014c). MakeFan8. Canisius College: Department of Physics. Recuperado de http://www3.canisius.edu/~sheets/IMP 8.html

Sheets, H. (2014d). PCAGen8. Canisius College: Department of Physics.

Sheets, H. (2014e). Regress8. Canisius College: Department of Physics. Recuperado de http://www3.canisius.edu/~sheets/IMP 8.html.

Sheets, H. (2014f). TwoGroup8. Canisius College: Department of Physics. Recuperado de http://www3.canisius.edu/~sheets/IMP 8.html

Skovrind, M., Olsen, M., Garrett Vieira, F., Pacheco, G., Carl, H., Thomas P. Gilbert, M., & Moller, P. (2016). Genomic population structure of freshwater-resident and anadromous ide (*Leuciscus idus*) in north-western Europe. *Ecology and Evolution, 6*(4):1064-74.

Sonah, H., Bastien, M., Iquira, E., Tardivel, A., Légaré, G., Boyle, B., … Belzile, F. (2013). An improved Genotyping by Sequencing (GBS) approach offering increased versatility and efficiency of SNP discovery and genotyping. *PloS one, 8*(1), e54603.

Toro, M., Manriquez, G., & Suazo, I. (2010). Morfometría geométrica y el estudio de las formas biológicas: De la morfología descriptiva a la morfología cuantitativa. *International Journal of Morphology, 28*(4), 977-990.

Torregroza, A., Narváez, J., & Orozco, G. (2015). Variabilidad genética en la producción de larvas de *Prochilodus magdalenae* usadas en programas de repoblamiento en el río. *Hidrobiológica, 25*(2), 187-192.

Trapani, J. (2003). Geometric Morphometric Analysis of Body-Form Variability in *Cichlasoma minckleyi*, the Cuatro Cienegas cichlid. *Environmental Biology of Fishes, 68*(4), 357-369.

Usma, J., Valderrama, M., Escobar, M., Ajiaco, R., Villa, F., Castro, F., … Cipamocha, C. (2009). Peces dulceacuícolas migratorios en Colombia. En L. Naranjo & J. Amaya (Eds.), Plan Nacional de las especies migratorias (1.a ed., pp. 103-131). Bogotá. Recuperado de http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Planes-para-la-conservacion-y-uso-de-la-biodiversidad/211010_plan_especies_migratorias.pdf

Usma, J., Villa, F., Lasso, C., Castro, F., Zuñiga, P., Cipamocha, C., … Suárez, J. (2013). Peces dulceacuícolas migratorios de Colombia. En L. Zapata & J. Usma (Eds.), Guía de las especies migratorias de la biodiversidad en Colombia. Peces (2.a ed., pp. 344-346).

Valderrama, M, & Petrere, M. (1994). Crecimiento del bocachico *Prochilodus magdalenae* (Steindachner 1878) (Prochilodontidae), y su relación con el régimen hidrológico en la parte baja de la cuenca del río Magdalena (Colombia). *Boletín Científico Instituto Nacional de Pesca y Acuicultura, 23*, 37-40.

Valderrama, Mauricio. (2004). Estado de la población de bocachico *Prochilodus magdalenae* (Pisces: Characiformes) y su manejo en la cuenca del rio Sinú, Colombia. *Dahlia Revista Asociación Colombiana de Ictiología, 7*, 3-12.

Valderrama, M., Jiménez, L., López, S., Rivas, T., Rincón, C., Nieto, S., … Salas, F. (2011). *Prochilodus magdalenae* (Characiformes, prochilodontidae). En C. Lasso, E. Agudelo, L. Jiménez, H. Ramírez, M. Morales, R. Ajiaco, … A. Sanabria (Eds.), I. Catálogo de los recursos pesqueros continentales de Colombia. Serie editorial recursos hidrobiológicos y pesqueros continentales de Colombia. (pp. 305-311). Bogotá: Instituto de Investigación de los Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH).

Vartia, S., Villanueva, J. L., Finarelli, J., Farrell, E. D., Collins, P. C., Hughes, G. M., … Carlsson, J. (2016). A novel method of microsatellite genotyping-by-sequencing using individual combinatorial barcoding. *Royal Society Open Science, 3*(1), 150565.

Vignal, A., Milan, D., SanCristobal, M., & Eggen, A. (2002). A review on SNP and other types of molecular markers and their use in animal genetics. *Genetics Selection Evolution, 34*(3), 275-305.

Viloria de la hoz, J. (2008). Economía extractiva y pobreza en la ciénaga de Zapatosa. Recuperado de http://www.banrep.gov.co/es/contenidos/publicacion/econom-extractiva-y-pobreza-ci-naga-zapatosa

Ward, R. D., Woodwark, M., & Skibinski, D. (1994). A comparison of genetic diversity levels in marine, freshwater, and anadromous fishes. *Journal of Fish Biology, 44*(2), 213-232.

Webster, M., & Sheets, H. D. (2010). A practical introduction to landmark-based geometric morphometrics. En J. Alroy & G. Hunt (Eds.), Quantitative methods in Paleobiology (Vol. 16, pp. 163-188).

Weir, B. S., & Cockerham, C. C. (1984). Estimating F-Statistics for the analysis of population structure. Evolution, 38(6), 1358-1370.

Wright, S. (1951). The genetical structure of populations. *Annals of Eugenics, 15*(4), 323-354.

Yang, W., Kang, X., Yang, Q., Lin, Y., & Fang, M. (2013). Review on the development of genotyping methods for assessing farm animal diversity. *Journal of animal science and biotechnology, 4*(2), 1-6.

Yazbeck, G., & Kalapothakis, E. (2007). Isolation and characterization of microsatellite DNA in the piracema fish *Prochilodus lineatus* (Characiformes). *Genetics and molecular research, 6*(4), 1026-1034.

Zamudio, J. E., Herrera, E. E., Maldonado, J. A., & DoNascimiento, C. (2016). Protocolo para la medición de rasgos funcionales en peces dulceacuícolas. En B. Salgado (Ed.), La ecología funcional como aproximación al estudio, manejo y conservación de la biodiversidad: protocolos y aplicaciones (pp. 180-211). Bogotá, D. C. Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Zelditch, M, Swiderski, D., & Sheets, H. D. (2012). Geometric Morphometrics for Biologists: A Primer. (A. Press, Ed.) (2nd ed.). Oxford: Elsevier.

Zelditch, Miriam, & Swiderski, D. (2018). A Practical Companion to Geometric Morphometrics for Biologists: Running analyses in freely-available software (Second Edition). Recuperado de https://booksite.elsevier.com/9780123869036/content/Workbook.pdf

Zheng, X., Levine, D., Shen, J., Gogarten, S., Laurie, C., & Weir, B. (2012). A high-performance computing toolset for relatedness and principal component analysis of SNP data. *Bioinformatics, 28*(24), 3326–3328.