

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Programa de Posgrado en Ciencias de la Vida con
orientación en Biología Ambiental**

**Caracterización del hábitat de la trucha arcoíris (*Oncorhynchus
mykiss nelsoni*) en la Sierra de San Pedro Mártir, Baja California, y
su relación con la densidad y estructura poblacional**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Mariana Solís Mendoza

Ensenada, Baja California, México

2016

Tesis defendida por

Mariana Solís Mendoza

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Gorgonio Ruiz Campos
Codirector de tesis

Dr. Jaime Luévano Esparza
Codirector de tesis

Dr. Eric Mellink Bijtel

Dra. Carmen Guadalupe Paniagua Chávez



Dra. Clara Elizabeth Galindo
Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Vida

Dra. Rufina Hernández Martínez
Directora de Estudios de Posgrado

Mariana Solís Mendoza © 2016

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis

Resumen de la tesis que presenta **Mariana Solís Mendoza**, como requisito parcial para la obtención del grado de Maestra en Ciencias en Ciencias de la Vida con orientación en Biología Ambiental

Caracterización del hábitat de la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss nelsoni*) en la Sierra de San Pedro Mártir, Baja California, y su relación con la densidad y estructura poblacional

Resumen aprobado por:

Dr. Gorgonio Ruiz Campos
Codirector de tesis

Dr. Jaime Luévano Esparza
Codirector de tesis

Se caracterizó el hábitat de la subespecie endémica de trucha de la Sierra de San Pedro Mártir, *Oncorhynchus mykiss nelsoni* y su relación con la densidad y estructura poblacional de la misma en tres localidades en la pendiente occidental de la Sierra de San Pedro Mártir, a través de un intervalo de altitud de 530 a 2,030 msnm, durante siete eventos de muestreo entre septiembre de 2014 y agosto de 2015. Se realizaron transectos de longitud variable (300-400 m) para identificar las unidades de hábitat presentes y determinar las variables ambientales asociadas, obteniendo en cada una de ellas la densidad y la estructura de tallas de la trucha. Se caracterizaron 110 unidades de hábitat que se agruparon en diez tipos diferentes, siendo el Arroyo San Rafael el que registró la mayor diversidad de unidades de hábitat (10) en comparación con los arroyos San Antonio de Murillos (6) y La Grulla (2). Las unidades de hábitat más importantes en cobertura fueron “corriente de flujo laminar” (Arroyo San Rafael) y “poza con erosión central” (arroyos La Grulla y San Antonio de Murillos). La densidad de truchas (individuos/m²) registró valores de 0.063-0.065 (Arroyo La Grulla), 0.020-0.027 (Arroyo San Antonio de Murillos) y 0.007-0.098 (Arroyo San Rafael). Las variables ambientales que mejor explicaron la variación en la densidad de truchas entre las unidades de hábitat muestreadas fueron aquellas relacionadas con la superficie de microhábitat. La información sobre los niveles de densidad y estructura de talla de esta subespecie endémica en los diferentes tipos de hábitat puede ser de gran utilidad en los programas de conservación y manejo para determinar la cantidad y calidad del hábitat requerido por esta especie, así como constituir una línea base para el futuro monitoreo poblacional y evaluación de la integridad de sus hábitats.

Palabras clave: trucha endémica, unidad de hábitat, densidad, factores ambientales, monitoreo de hábitat.

Abstract of the thesis presented by Mariana Solís Mendoza as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Life Sciences with orientation in Environmental Biology

Habitat characterization of the rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss nelsoni*) in the Sierra de San Pedro Mártir, Baja California, and its relationship with the density and population structure.

Approved by:

Dr. Gorgonio Ruiz Campos
Codirector de tesis

Dr. Jaime Luévano Esparza
Codirector de tesis

I characterized the habitat of the trout subspecies endemic to the Sierra San Pedro Mártir, *Oncorhynchus mykiss nelsoni* and determined its relation with the population density and structure was carried out in three sites of its distribution on the western slope of the Sierra de San Pedro Mártir, through an altitude range of 530-2,030 meters above sea level for seven sampling events between September 2014 and August 2015. Transects of variable length (300-400 m) were performed to identify the habitat unities and determine the associated environmental variables, obtaining in each, the trout density and structure. A total of 110 habitat unities belonging to ten different types were characterized, where the Arroyo San Rafael recorded the highest diversity of habitat unities (10), in comparison with Arroyo San Antonio de Murillos (6) and Arroyo La Grulla (2). The most important habitat unity in cover was Glide (Arroyo San Rafael) and Mid-Channel Pool (Arroyo La Grulla and Arroyo San Antonio de Murillos). Trout density (individuals/m²) recorded values of 0.063-0.065 (Arroyo La Grulla), 0.020-0.027 (Arroyo San Antonio de Murillos) and 0.007-0.098 (Arroyo San Rafael). The environmental variables that best explained the variation in the density of trout among the sampled habitat unities were those related to the surface of microhabitats. Information on levels of density and structure (sizes) of this endemic trout in the different types of habitats can be of great usefulness in the programs of conservation and management for determining the quantity and quality of habitat required by this subspecies, as well as a base line for future population monitoring and evaluation of the integrity of their habitats.

Keywords: endemic trout, habitat unit, density, environmental factors, habitat monitoring.

Dedicatoria

A mi familia, no sólo a la de similitud genética sino también a la que he hecho al andar.

A Arnulfo, X'eni, Daniela, Itauhki por estar siempre y bien, porque el amor engendra. Los amo infinitamente y siempre les abrazo, gracias siempre.

A mi procarionte favorito: Rivas.

Agradecimientos

Al ser producto de la educación pública agradezco al pueblo mexicano que ha pagado mis estudios en cada uno de sus niveles, esperando retribuirle en un futuro dicho honor. A CONACYT por gestionar esos recursos y otorgarme una beca de educación.

Este proyecto deriva logística y económicamente del proyecto interno de 17va. Convocatoria Interna de Investigación de la Universidad Autónoma de Baja California, denominado Caracterización de hábitats acuáticos de la Sierra de San Pedro Mártir, Baja California, y su relación con la densidad y estructura poblacional de la trucha endémica *Oncorhynchus mykiss nelsoni* (Evermann, 1908)"; el cual fue dirigido por el Dr. Gorgonio Ruiz Campos desde agosto de 2013 a agosto de 2015.

A mis directores de tesis, al Dr. Gorgonio Ruiz Campos por su dirección a través de todo este proceso de tesis, fue realmente una dicha el conocer a un hombre de ciencia y un naturalista que puede compartir con amabilidad, humanidad y paciencia su conocimiento y experiencias sobre el mundo biológico. Mi gran admiración, respeto y gratitud. Al Dr. Jaime Luévano Esparza por la dirección y la gestión de condiciones adecuadas, así como por su gran profesionalismo en cada una de las etapas de este proyecto, fue un placer el poder trabajar en conjunto.

A los miembros del comité por sus atinadas correcciones y sugerencias en todo el proceso de tesis, al Dr. Eric Mellink Bijtel por su alto nivel de exigencia coadyuvo a un mejor proyecto. A la Dra. Carmen Paniagua Chávez por compartir sus experiencias de trabajo con la especie de estudio y por su paciencia.

A la Dra. María Concepción García Aguilar por su ayuda en el análisis de datos y sugerencias sobre el tratamiento estadístico.

Al Laboratorio de Vertebrados de la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de Baja California por el apoyo en el uso de sus instalaciones y equipo para el trabajo de gabinete y procesamiento de las muestras de invertebrados acuáticos.

Al Dr. Faustino Camarena Rosales, Dra. Asunción Andreu Soler, M. en C. Bertha Paulina Díaz-Murillo, Biól. Edgar Octavio Flores Hernández, M. en C. Aldo A. Guevara Carrizales, Biól. José Sánchez Medina, Juan Ávila

Corral, Orlando Acosta Seaman, M. en C. Carlos A. Ballesteros Córdova, Itauhki Solís Mendoza y Dr. Gerardo Rivas Lechuga por su apoyo en los muestreos de truchas y en la caracterización de los hábitats en la Sierra de San Pedro Mártir.

Al personal del Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir por las atenciones y el apoyo logístico para el acceso al sitio de La Grulla.

A Rolando Arce e Indalecio Salazar por el apoyo con mulas y caballos para el transporte de personas y equipos a los sitios de muestreo del presente trabajo.

A CICESE y a sus investigadores Dr. Stephen Bullock, Dr. Horacio de la Cueva y Dr. Jorge Rosales Casián.

Al personal de CICESE que con su eficiente trabajo facilitó este proceso, Adriana Mejía, Eva Robles y Elizabeth Avilés.

A mis compañeros, con mención especial a Marisela Juárez Rodríguez, por darme hospedaje y facilidades. A Brenda Anda por haber cohabitado contigo, te abrazo siempre. A Rigo, Antonio, Gato, Denisse, Ruth, Dani, Leo, Priscila, Nadia, Bea, Fortunato, Alex y Clau por los ánimos y ayuda en alguna fase del proceso.

A las personas que estuvieron conmigo a la distancia: Yessica, Elo, Vero, Nahú.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatorias.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	ix
Lista de tablas.....	xii
1. Introducción.....	1
2. Antecedentes.....	3
2.1 Taxonomía, distribución y biología de <i>Oncorhynchus mykiss nelsoni</i>	3
2.2 Factores de hábitat y su relación con la abundancia de salmónidos	5
2.2.1 Fisiografía de los arroyos	5
2.2.2 Parámetros fisicoquímicos.....	6
2.2.3 Factores bióticos.....	7
2.2.4 Densidad, estructura poblacional y área casera.....	8
2.3 Sistemas de clasificación de hábitat en salmónidos.....	8
3. Justificación	10
4. Hipótesis.....	11
5. Objetivos	12
5.1 Objetivo general	12
5.2 Objetivos específicos.....	12
6. Materiales y métodos	13
6.1 Área de estudio.....	13
6.1.1 Localización.....	13
6.1.2 Geomorfología	13
6.1.3 Hidrología.....	13
6.1.4 Climatología.....	15
6.1.5 Vegetación.....	15
6.2 Muestreos	16
6.3 Inventario y caracterización de unidades de hábitat	17
6.4 Caracterización ecológica del hábitat	20
6.4.1 Caracterización fisiográfica	20
6.4.2 Caracterización fisicoquímica del agua	20

6.4.3 Factores bióticos	21
6.5 Densidad de truchas y su estructura poblacional.....	21
6.6 Análisis estadístico.....	22
7. Resultados.....	24
7.1 Caracterización Fisiográfica e Hidrométrica.....	24
7.1.1 Arroyo La Grulla	24
7.1.2 Arroyo San Antonio de Murillos.....	24
7.1.3 Arroyo San Rafael	25
7.2 Factores fisicoquímicos.....	27
7.3 Clasificación del hábitat	29
7.3.1 Arroyo La Grulla	29
7.3.2 Arroyo San Antonio de Murillos.....	31
7.3.3 Arroyo San Rafael	34
7.4 Densidad de truchas	39
7.4.1 Arroyo La Grulla	39
7.4.2 Arroyo San Antonio de Murillos.....	40
7.4.3 Arroyo de San Rafael	41
7.5 Estructura de tallas.....	43
7.5.1 Arroyo La Grulla	44
7.5.2 Arroyo San Antonio de Murillos.....	44
7.5.3 Arroyo de San Rafael	49
7.6 Comparación de densidad de truchas por unidad de hábitat	51
7.7 Análisis de factores bióticos y abióticos por tipo de hábitat	52
8. Discusión	54
8.1 Factores fisicoquímicos.....	54
8.2 Clasificación del hábitat	55
8.3 Densidad de truchas	57
8.4 Estructura de tallas.....	57
8.5 Frecuencia de truchas en los macrohábitats y unidades de hábitat	58
8.6 Análisis de factores bióticos y abióticos por tipo de unidad de hábitat	59
8.7 Recomendaciones sobre manejo y conservación.....	60
9. Conclusiones	62
Literatura citada.....	63
Anexos.....	72
Anexo 1	72
Anexo 2	78
Anexo 3	80

Lista de figuras

Figura	Página
1	Imagen del área del segmento muestreado y los tipos de unidades de hábitat en el Arroyo La Grulla durante septiembre de 2014 (a) y agosto de 2015 (b)..... 29
2	Esquema de superficie donde se representa el área estimada por tipo de unidad de hábitat en el Arroyo La Grulla, durante septiembre de 2014 y agosto de 2015. 30
3	Fotografías comparativas de los sitios de muestreo en el Arroyo La Grulla en septiembre de 2014 (a y c) y agosto de 2015 (b y d). Las fotografías en cada fila corresponden a los mismos sitios de muestreo..... 31
4	Imagen del área del segmento muestreado y los tipos de unidades de hábitat en el Arroyo San Antonio de Murillos durante mayo de 2014 y abril de 2015. 32
5	Mapa esquemático del área estimada de cada tipo de unidad de hábitat en Arroyo San Antonio de Murillos durante mayo de 2014 y abril de 2015..... 33
6	Imagen del área del segmento muestreado y los tipos de unidades de hábitat en el Arroyo San Rafael durante los muestreos de febrero de 2014 y marzo de 2015. 35
7	Esquema de superficie donde se representa el área estimada por tipo de unidad de hábitat en el Arroyo San Rafael (sitio 1) durante febrero de 2014 y marzo de 2015..... 36
8	Imagen área del segmento muestreado y los tipos de unidades de hábitat en el Arroyo San Rafael (sitio 2), durante mayo de 2015. 36
9	Esquema de superficie donde se representa el área estimada por tipo de unidad de hábitat en el Arroyo San Rafael (sitio 2) durante mayo de 2015..... 37
10	Porcentaje de superficie cubierta por tipo de unidad de hábitat en la localidad de Arroyo San Rafael, durante los muestreos de febrero de 2014 (a), marzo de 2015 (b) y mayo de 2015 (c)..... 37
11	Dinámica y cambios de vegetación en el Arroyo San Rafael. La imagen de la izquierda corresponde a febrero de 2014 (a, c, e) y la imagen de la derecha (b, d, f) a marzo de 2015. 38

12	Representación de los tipos de unidades de hábitat presentes en el Arroyo La Grulla, muestreados para determinar la estructura y densidad poblacional de la trucha en septiembre de 2014 y agosto de 2015.	39
13	Representación de los tipos de unidades de hábitat presentes en el Arroyo San Antonio de Murillos, muestreados para determinar la estructura y densidad poblacional de trucha en mayo de 2014 y abril de 2015.	40
14	Representación de los tipos de unidades de hábitat muestreados en el Arroyo San Rafael, para determinar la estructura y densidad poblacional de truchas en febrero de 2014 y marzo de 2015.	42
15	Estructura poblacional por frecuencias de tallas y las clases de edad de la trucha determinadas por el método de Bhattacharya en la localidad de Arroyo La Grulla durante el muestreo de septiembre de 2014.....	45
16	Estructura poblacional por frecuencias de tallas y las clases de edad de la trucha determinadas por el método de Bhattacharya en la localidad de Arroyo La Grulla durante el muestreo de agosto de 2015.....	46
17	Estructura poblacional por frecuencias de tallas y las clases de edad de la trucha determinadas por el método de Bhattacharya en la localidad de Arroyo San Antonio de Murillos durante el muestreo de mayo de 2014.....	47
18	Estructura poblacional por frecuencias de tallas y las clases de edad de trucha determinadas por el método de Bhattacharya en la localidad de Arroyo San Antonio de Murillos durante el muestreo de abril de 2015.....	48
19	Estructura poblacional por frecuencias de tallas y las clases de edad de trucha determinadas por el método de Bhattacharya en la localidad de Arroyo San Rafael durante el muestreo de febrero de 2014.	49
20	Intervalos de tallas en el Arroyo San Rafael durante el muestreo de marzo de 2015.	50
21	Intervalos de tallas para la población total (a) y para las unidades de hábitat de corriente (b) y corriente en escalón (c) en el Arroyo Rafael durante el muestreo de mayo de 2015.....	50
22	Mapa de la magnitud de las variables estructurales de hábitat en la variación explicada de la abundancia (densidad) de la trucha de San Pedro Mártir. La distancia desde el origen indica la magnitud. La distancia de separación entre líneas (activas) indica el grado de correlación entre ellas, cuanto más cercanas mayor es la correlación. Líneas opuestas indican una correlación negativa.	52

23	Mapa de la magnitud de las variables fisicoquímicas del hábitat en la variación explicada de la abundancia (densidad) de la trucha de San Pedro Mártir. La distancia desde el origen indica la magnitud. La distancia de separación entre líneas (activas) indica el grado de correlación entre ellas, cuanto más cercanas mayor es la correlación. Líneas opuestas indican una correlación negativa.	53
24	Poza en la localidad de La Grulla en años diferentes: a) septiembre de 1991 (Ruíz-Campos, 1993), y b) agosto de 2015 (este estudio). Se observa que el nivel del arroyo que drena a la poza disminuyó notablemente.....	55
25	(a) Arroyo San Antonio de Murillos en 1936 (Needham, 1938), y (b) Arroyo San Antonio de Murillos en mayo de 2015 (este estudio).	56

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Descripción de los tipos de microhábitats registrados en los arroyos de la Sierra de San Pedro Mártir y las siglas utilizadas para su identificación.....	18
2	Factores fisiográficos e hidrométricos de los arroyos de la Sierra de San Pedro Mártir, durante los muestreos realizados de febrero de 2014 a agosto de 2015 (media \pm desviación estándar y, en renglón inferior, rango)	26
3	Factores fisicoquímicos de los arroyos de la Sierra de San Pedro Mártir, durante los muestreos realizados de febrero de 2014 a agosto de 2015 (media \pm desviación estándar y, en renglón inferior, rango). El asterisco (*) denota que no se cuenta con el registro.....	28
4	Superficie cubierta en metros cuadrados y en porcentaje por cada tipo de unidad de hábitat en el Arroyo San Antonio de Murillos durante mayo de 2014 y abril de 2015.....	33
5	Superficie cubierta, individuos y densidad poblacional de trucha por tipo de unidad de hábitat en el Arroyo La Grulla durante septiembre de 2014 y agosto de 2015.	39
6	Superficie cubierta, individuos y densidad poblacional de trucha por tipo de unidad de hábitat en el Arroyo San Antonio de Murillos durante mayo de 2014 y abril de 2015.	41
7	Superficie cubierta, individuos y densidad poblacional de truchas por tipo de unidad de hábitat en el Arroyo de San Rafael durante febrero de 2014, marzo y mayo de 2015.	43

1. Introducción

El hábitat, definido como el lugar donde vive un organismo y obtiene los recursos y condiciones para su existencia (Hall et al. 1997; Begon et al., 1999), constituye la base para la mayoría de las evaluaciones de impacto ambiental, inventarios de recursos bióticos, planes de gestión de especies, planes de mitigación y regulación ambiental. Una de las principales ventajas de la utilidad del hábitat como unidad de investigación y conservación es su relativa estabilidad a través del tiempo y su facilidad para definir términos físicos intuitivos, proporcionando, además, un recurso tangible para la gestión, negociación y toma de decisiones (Bain y Stevenson, 1999).

En virtud de lo anterior, es necesario contar con un método estandarizado para el análisis cualitativo y cuantitativo de los hábitats. En lo concerniente a ecosistemas de agua dulce, la caracterización mediante el uso de unidades de hábitat resulta ser una importante herramienta para tal efecto, siendo éstas definidas como las porciones del arroyo que pueden ser delimitadas visualmente con base en atributos fisiográficos (morfología del canal, profundidad, sustrato, pendiente, bancos, etc.) e hidrométricos (velocidad de corriente, flujo hidráulico, etc.) (Bryant et al., 1992). Con base en lo anterior, los hábitats acuáticos de los arroyos de montaña de Norteamérica donde se distribuyen peces salmónidos se clasifican en tres categorías mayores o macrohábitats (poza, rápido y corriente) y éstas, a su vez, en 24 tipos de unidades de hábitat o microhábitats (USDA-USFS, 1990).

Las unidades de hábitat han sido utilizadas en forma estandarizada para la evaluación de la calidad y cantidad de hábitats de peces salmónidos en Norteamérica, pero en México sólo existe un referente sobre el uso de este método para evaluar poblaciones de truchas nativas, específicamente para la trucha aparique (*Oncorhynchus* sp.) en un tributario del Río Conchos en el estado de Chihuahua (Ruiz-Campos, 2008).

En los arroyos de la pendiente occidental de la Sierra de San Pedro Mártir (SSPM) (Baja California, México), en un intervalo de altitud de 540 a 2,030 metros sobre el nivel del mar, se distribuye la trucha endémica de San Pedro Mártir, *Oncorhynchus mykiss nelsoni* (Ruiz-Campos, 1993; Ruiz-Campos y Pister, 1995), la subespecie más austral del complejo arcoíris-costero (Behnke, 2010). Esta subespecie está protegida por la legislación mexicana (NOM-ECOL-059) en la categoría de protección especial (Semarnat, 2010).

Aunque el estatus actual de la trucha de San Pedro Mártir es considerado estable (Ruiz-Campos y Pister, 1995; Ruiz-Campos et al., 2014), sus poblaciones y hábitats podrían ser susceptibles a cambios en un corto plazo debido al disturbio por actividades antropogénicas, tales como la canalización del flujo para irrigación agrícola, la deforestación de la vegetación ribereña, las actividades de ganadería y la introducción de especies exóticas, entre otras (Ruiz-Campos, 2016); y en un mediano y largo plazo por el inminente cambio climático global (Penaluna et al., 2016).

A pesar de que se han descrito los hábitats de esta trucha nativa en el periodo de 1989 a 1993 en diferentes localidades de su distribución en la SSPM (Ruiz-Campos, 1993), resulta imperativo evaluar y caracterizar el estado actual de los mismos mediante un método estandarizado basado en unidades estructurales de hábitat que permitan generar una línea base de información para el monitoreo de la calidad y cantidad de los hábitats, así como de la abundancia y estructura poblacional de la trucha. Este método estandarizado podrá ser utilizado como una herramienta para los programas de conservación de esta trucha endémica y de sus hábitats.

2. Antecedentes

2.1 Taxonomía, distribución y biología de *Oncorhynchus mykiss nelsoni*.

La subespecie objeto de estudio pertenece a la familia Salmonidae. Esta familia incluye a los ciscos (Coregoninae), timalos (Thymallinae), truchas y salmones (Salmoninae), todos ellos de distribución holártica (Behnke, 2010). Dentro de esta última subfamilia se ubican los géneros *Salmo*, *Salvelinus* y *Oncorhynchus*, cuyos miembros gozan de una gran popularidad en la pesca deportiva y comercial, especialmente aquellas formas de naturaleza anádroma, es decir, las que pasan su vida adulta en el mar, pero migran a los ríos de origen para reproducirse.

A nivel mundial, el género *Oncorhynchus* incluye a 10 especies y 28 subespecies nominales, de las cuales 9 especies y 25 subespecies son nativas de Norteamérica. En este género se incluyen el salmón del Pacífico, la trucha arcoíris, la trucha de banda roja, la trucha dorada de California, la trucha garganta cortada, la trucha apache, la trucha Gila, la trucha dorada mexicana (Behnke, 2010), y un grupo de truchas parecidas a la trucha arcoíris de la Sierra Madre Occidental de México (Ruiz-Campos et al., 2003; Mayden et al., 2010).

La trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) posee tanto formas de naturaleza anádromas como dulceacuícolas a través de su ámbito de distribución nativa, el cual es el norte del océano Pacífico desde Japón, pasando por el mar de Bering y el Río Kuskokwin, Alaska, hasta el Río Santo Domingo en el norte de Baja California, México (Behnke, 1992, 2010). Actualmente, y debido a su propagación para fines de cultivo desde el año 1872, su distribución se ha ampliado al Este de Norteamérica, África, Australia, Asia, Europa y Sudamérica (MacCrimmon, 1971).

La trucha de San Pedro Mártir (*Oncorhynchus mykiss nelsoni*), considerada como la subespecie de trucha arcoíris más sureña dentro de la especie (Behnke, 1992, 2010), fue recolectada por primera vez en 1902 por E. Heller, quien capturó cuatro individuos en la localidad "Rancho San Antonio" [de Murillos] en la Sierra de San Pedro Mártir. Tres años más tarde, en esa misma localidad, Edward W. Nelson capturó nueve individuos

(Needham, 1938), a los que Barton W. Evermann describió como una nueva especie a la que denominó *Salmo nelsoni* (Evermann et al., 1908).

El comportamiento no migratorio y la capacidad euritérmica de la trucha nativa de la Sierra de San Pedro Mártir motivaron a investigadores estadounidenses a realizar tres expediciones a la localidad tipo “Rancho San Antonio” entre los años 1936 y 1938, con la finalidad de capturar individuos para obtener un stock reproductivo que permitiera su introducción potencial en arroyos de California y Oregon (E.U.A.) (Needham, 1938; 1955).

La distribución original de la trucha de San Pedro Mártir es de aproximadamente 24 km a lo largo del Arroyo Santo Domingo (en la localidad de Rancho San Antonio) (Evermann et al., 1908; Snyder 1926). Desde el año 1929 al 1941 Charles Edward Utt translocó individuos de la trucha arcoíris nativa desde la localidad tipo (Rancho San Antonio) hacia varios arroyos dentro de la SSPM, tales como La Grulla (en 1935 y 1936), La Misión o San Pedro (1936), La Zanja (1935 y 1936), Valladares (1937 y 1941) y San Rafael (1938 y 1939) (Utt, 1991). Actualmente existen poblaciones de esta trucha en dichas localidades (Ruiz-Campos y Gómez-Ramírez, 1991; Ruiz-Campos, 1993; Ruiz-Campos y Pister, 1995; Ruiz-Campos et al., 2014) excepto en el Arroyo de Valladares (Ruiz-Campos, 1993). De este modo, la trucha de San Pedro Mártir se distribuye actualmente en los dos sistemas hidrológicos principales: Santo Domingo (arroyos La Grulla, San Antonio de Murillos, El Potrero y la Zanja) y San Rafael (Arroyo San Rafael), entre 540 y 2,030 msnm (Ruiz-Campos et al., 2014).

Esta trucha arcoíris endémica bajacaliforniana es pequeña (<220 mm de longitud patrón), de crecimiento lento y vida corta (hasta cuatro años) (Ruiz-Campos y Gómez-Ramírez, 1991; Ruiz-Campos et al., 1997). Presenta dos fases de coloración, una clara y una oscura, correspondientes a las zonas lólicas y lénticas, respectivamente (Ruiz-Campos, 1993). Las hembras tienen el diámetro del ojo similar a la longitud rostral, mientras que en los machos éste es comparativamente menor que la longitud del rostro. Los machos más longevos desarrollan una protuberancia oscura en la parte apical de la maxila (Ruiz-Campos, 1993, 2016). La madurez gonadal de las hembras ocurre al año de edad, cuando alcanzan tallas comprendidas entre 103 y 112 mm de longitud patrón (LP). Según Ruiz-Campos (1993), el 100% de las truchas son maduras a partir de los 123 mm de LP y dos años de edad, mientras que los machos alcanzan la madurez reproductiva entre los 15 y 18 meses.

Esta subespecie desova durante el invierno (enero a marzo), con mayor actividad reproductiva en el mes de febrero. El reclutamiento de juveniles a la población ocurre en mayo y junio (Ruiz-Campos, 1993; Ruiz-Campos et al., 1997). La fecundidad relativa promedio es de 15.3 huevos por centímetro de longitud patrón (Ruiz-Campos, 1993). Se alimenta principalmente de insectos y tiene una dieta selectiva dominada por cuatro tipos de presas que, en conjunto, forman el 90% de su alimentación: larvas y pupas de dípteros de la familia Simuliidae, larvas de tricópteros pertenecientes a las familias Hydropsychidae, Seriscotomatidae e Hydroptilidae (Ruiz-Campos y Cota-Serrano, 1992; Ruiz-Campos, 1993). El área de actividad promedio es de 60.2 m², presentando una correlación positiva la extensión del área con la descarga o flujo del arroyo y la densidad de presas a la deriva (Ruiz-Campos y Villalobos-Ramírez, 1991; Ruiz-Campos, 1993).

El estatus poblacional de la trucha de San Pedro Mártir durante los últimos 25 años se evaluó entre 1987 y 1994 (Ruiz-Campos y Pister, 1995) y entre 2000 y 2014 (Ruiz-Campos et al., 2014). Estos estudios demostraron la existencia de fluctuaciones poblacionales interanuales asociadas a cambios en los niveles de flujo de los arroyos por efecto de la sequía en verano y la inundación por las lluvias en invierno, principalmente, si bien también hay que tener en cuenta el depósito ocasional de cenizas en los arroyos tras los incendios forestales (Ruiz-Campos, 1993; Ruiz-Campos et al., 2014).

2.2 Factores de hábitat y su relación con la abundancia de salmónidos

2.2.1 Fisiografía de los arroyos

La preferencia que tienen los salmónidos por cierta profundidad varía en función del tamaño de los individuos: aquellas especies con tallas grandes prefieren profundidades entre los 15 y 35 cm y las especies con tallas pequeñas, profundidades entre 6 y 10 cm, si bien algunos prefieren sumergirse a zonas más profundas para desovar (Meehan, 1991). La trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) prefiere profundidades ≥ 18 cm, velocidades de agua de 11-72 cm/s y tamaño de grano del sustrato de 0.6-10.2 cm (Hunter, 1973). *Oncorhynchus mykiss nelsoni* es más abundante en profundidades de 30 a 150 cm, las cuales corresponden a hábitats de pozas y zonas de recodos, prefiriendo los sustratos arenosos con un tamaño de grano de 0.07-

1.9 mm (Ruiz-Campos, 1993). El hábitat de esta trucha muestra una alta variación estacional e interanual en cuanto a fisiografía (profundidad, anchura y pendiente) y niveles de flujo, lo cual influye en la disponibilidad de alimento y, a su vez, el área de actividad de las truchas que allí concurren (Ruiz-Campos, 1993).

2.2.2 Parámetros fisicoquímicos

Las propiedades fisicoquímicas de los arroyos causan grandes variaciones en la productividad de un sistema (Crisp et al., 1974) y son dependientes de las características fisiográficas del arroyo y de las condiciones meteorológicas presentes (Ruiz-Campos, 1991, 1993). Uno de los factores fisicoquímicos que tiene un papel importante en todas las fases del ciclo de vida de los salmónidos es la temperatura, la cual influye en el proceso de migración (Major y Mighell, 1967; Hallock et al., 1970; Bjornn, 1971; Monan et al., 1975; Bell, 1986; Goniea et al., 2006), en el inicio de la etapa reproductiva (Davies y Bromage, 2002), en el desove (Reingold, 1968; Hunter, 1973) y en el desplazamiento y locomoción de los individuos (Bjornn, 1971). Asimismo, en todas las fases del ciclo de vida de los salmónidos, la fluctuación térmica genera un aumento en las tasas metabólicas y en los niveles de estrés (Jonsson et al., 1991).

El intervalo térmico óptimo para el crecimiento y alimentación en la trucha arcoíris de arroyos de montaña de California es de 13 a 21°C (Smith, 1991). En el caso de la trucha de San Pedro Mártir (*O. mykiss nelsoni*) el intervalo térmico para el crecimiento y alimentación óptimo de verano es de 14 a 28°C (Ruiz-Campos, 1993, 2016). En este sentido, las temperaturas más altas en el hábitat de distribución de esta subespecie podrían explicar su baja tasa de crecimiento somático y menor longevidad en comparación con truchas arcoíris más norteadas (Carlander, 1969; Knapp y Dudley 1990).

Otro factor fisicoquímico que puede afectar el crecimiento así como a la adecuación y capacidad de locomoción de salmónidos, tanto truchas como salmones, es el oxígeno disuelto (OD), ya que las larvas, al tener un sistema vascularizado poco desarrollado, requieren aguas bien oxigenadas (Northcote y Hartman, 2008). En las fases reproductivas de las truchas se requiere un 80% de saturación y no menos de 5.0 mg/l de oxígeno disuelto (Meehan, 1991). No obstante, concentraciones de 6.5-7 mg/l a temperaturas que oscilen entre 10 y 20 °C, pueden generar una disminución de la capacidad motriz y, como consecuencia, afectar diversas actividades como su conducta de forrajeo (Davis et al., 1963). En SSPM, el oxígeno disuelto en el

hábitat de *O. mykiss nelsoni* muestra valores diarios de 10.5-14.0 mg/l en invierno y 6.7-10.8 mg/l en verano y presenta una correlación negativa con la temperatura del agua (Ruiz-Campos, 1993)

Otro factor a tener en cuenta es la turbidez del agua, la cual depende del total de sólidos disueltos (TDS). En algunos casos, la turbidez impide que los peces se desplacen, como es el caso de los salmónidos anádromos que pueden ser afectados al retardar la migración (Cordone y Kelley, 1961; Bjornn, 1978). Bell (1986) observó que con una turbidez superior a 4,000 mg/l las truchas se mantenían quietas en el lecho del río. Sin embargo, aún cuando los niveles altos pueden afectar al movimiento de los individuos de salmones y truchas, en diversos casos parece no tener un efecto directo en su motilidad (Quinn y Fresh, 1984). En la SSPM, el total de sólidos disueltos presenta poca variación diaria y estacional, oscilando entre 140.6 y 148 mg/l (Ruiz-Campos, 1993).

2.2.3 Factores bióticos

Uno de los factores ecológicos con mayor influencia en la dinámica poblacional de las especies ícticas es la disponibilidad de alimento, misma que puede limitar la capacidad de sustento; es decir, la cantidad de peces que puede mantenerse en un río (Wynne-Edward, 1962; Bjornn y Reisser, 1991; Milner et al., 2003). En los arroyos de la SSPM, la biomasa total de presas es relativamente baja en comparación con otros sistemas acuáticos de tipo lótico (Ruiz-Campos, 1993), lo cual puede ser uno de los factores que inciden en la baja tasa de crecimiento somático de la trucha de San Pedro Mártir (Ruiz-Campos et al., 1997).

Otro de los factores bióticos influyentes en la distribución y abundancia de los peces salmónidos es la cobertura vegetal de la zona ribereña (bancos y planicie de inundación), la cual proporciona sombreado al arroyo reduciendo la temperatura por radiación solar, formando microhábitats térmicos que favorecen una mayor densidad de truchas (Chapman, 1966; Allen, 1968; Meehan, 1991). Para algunas especies, como la trucha arcoíris, la cobertura vegetal de los bancos y la planicie de inundación puede generar microhábitats que ofrecen protección a los juveniles (Chapman, 1966).

2.2.4 Densidad, estructura poblacional y área casera

La variación ambiental tiene un fuerte efecto sobre la densidad de salmónidos que habitan un río (Grossman et al., 1998). La densidad de salmónidos se encuentra regulada, entre otros, por mecanismos de retroalimentación denso-dependientes, la conducta territorial (tanto en intensidad como en tamaño de territorio), la disponibilidad de alimento (Milner et al., 2003), así como por conductas sociales en general (Le Cren, 1972). Por su parte, la estructura poblacional en salmónidos tiene una incidencia en la densidad de individuos debido a que la utilización de recursos difiere dependiendo de la fase del ciclo vida en la cual se encuentre la especie (Quinn y Peterson, 1996; Lobón-Cerviá, 2003). En el Arroyo San Rafael, entre 1987 y 1993, Ruiz-Campos (1993) encontró una densidad de 0.047 truchas/m² mientras que entre octubre de 2000 y febrero de 2014, la densidad encontrada por Ruiz-Campos (2014) fue de 0.041 individuos/m², lo cual demostró una relativa estabilidad en la densidad poblacional actual de esta trucha.

2.3 Sistemas de clasificación de hábitat en salmónidos

Los primeros sistemas de clasificación se basaron en la categorización de los ríos en jóvenes, maduros y seniles (Davies, 1989). Posteriores categorizaciones adicionaron factores fisiográficos a manera de lineamientos descriptivos y cualitativos como son la forma del arroyo (Melton, 1936; Leopold y Wolman, 1957; Lane, 1957), características de la estabilidad del canal y el transporte sedimentario (Schumm, 1963), así como factores de depósito, vegetación, formaciones de nivel, tipo de planicies de inundación y tipos de valle (Thornbury, 1969). Estos tipos de categorización cualitativa requieren criterios interpretativos delimitantes que permitan reducir la ambigüedad y la inconsistencia de la valoración, por lo que es necesario desarrollar sistemas de clasificación que incluyan medidas cuantitativas que tomen en consideración las dimensiones de los arroyos.

A finales de la década de 1970's, los sistemas de clasificación de hábitats en los cuerpos dulceacuícolas eran más objetivos y consistentes en comparación con los métodos arriba descritos, ya que incorporaban medidas cuantitativas de la morfología del canal, hidrología y estimaciones de densidad de peces salmónidos (Schumm, 1977; Church y Rood, 1983; Bryant et al., 1992; Rosgen, 1994). Estos sistemas de clasificación tuvieron una amplia diversificación en cuanto a protocolos de medición y aplicación para evaluación de

hábitats, situación que hizo necesaria la estandarización de criterios para propiciar la comparabilidad de resultados, por lo que en el año 1995 la American Fisheries Society (AFS) y el U.S. Fish and Wildlife Service, analizaron diversos métodos de evaluación de hábitat para salmónidos que eran utilizados por las agencias dedicadas al manejo de poblaciones de peces en aguas continentales y seleccionaron un conjunto de técnicas para ser utilizadas de manera estándar (Bain y Stevenson, 1999).

De las tres naciones de Norteamérica, México es la única que no cuenta con una estrategia federal o estatal en el monitoreo de hábitats y poblaciones de peces dulceacuícolas (Mercado-Silva y Bonar, 2013). Respecto al estudio de hábitat de salmónidos, la única referencia de investigación en la que se utilizó un método de los seleccionados por la AFS-USFWS, fue la desarrollada en el Arroyo Ureyña (cuenca alta del Río Conchos, Bocoyna, Chihuahua). En dicho estudio se evaluó el hábitat de la trucha nativa aпарique *Oncorhynchus* sp., considerando el tipo de sustrato, el porcentaje de inclinación del arroyo, el área de cada unidad de hábitat y la vegetación ribereña asociada, entre otras variables, determinando siete tipos diferentes de unidades de hábitat (Ruiz-Campos, 2008).

En las expediciones de recolecta de la trucha de San Pedro Mártir, varios autores han registrado datos puntuales de la morfología y flujo de los arroyos (Nelson, 1921; Needham, 1938). Sin embargo, no fue hasta los estudios de Ruiz-Campos (1993) cuando se realizó una investigación formal del hábitat y de las poblaciones de *O. mykiss nelsoni*, registrándose las siguientes variables del hábitat: fisiográficas (anchura y profundidad del arroyo, composición del sustrato), hidrométricas (velocidad de corriente y tasa de descarga del arroyo), fisicoquímicas (temperatura del aire y del agua, oxígeno y bióxido de carbono disueltos, potencial de iones de hidrógeno, dureza total, dureza de calcio, magnesio, silicatos, fosfatos, y nitratos), y bióticas (densidad y diversidad de presas bentónicas y de deriva). En ese mismo estudio se realizó una descripción fisiográfica detallada de una sección de 300 m del Arroyo San Rafael que incluyó: tipo de sustrato, tipo de macrohábitats (e.g. pozas, rápidos, cascadas y remansos), vegetación de los bancos, vegetación arbórea y anchura del cauce.

3. Justificación

El estatus de conservación de la trucha de San Pedro Mártir es considerado estable (Ruiz-Campos y Pister, 1995; Ruiz-Campos et al., 2014) pero sus poblaciones y hábitats podrían ser susceptibles a cambios en un corto plazo debido al disturbio por actividades antropogénicas tales como la canalización del flujo para irrigación agrícola, la deforestación de la vegetación ribereña, las actividades de ganadería y la introducción de especies exóticas, entre otras (Ruiz-Campos, 2016); y en un mediano y largo plazo por el inminente cambio climático global (Penaluna et al., 2016).

Para desarrollar un plan de conservación es necesario evaluar y conocer los requerimientos de hábitat de la trucha de San Pedro Mártir. Se han realizado esfuerzos importantes para este efecto caracterizando el hábitat de la trucha entre 1989 y 1993 (Ruiz-Campos, 1993) pero la carencia de un método estandarizado impide la comparación de resultados, por lo cual este trabajo brindaría un método estándar que permite determinar la importancia de las variables ambientales como predictores de la densidad y estructura poblacional y proporciona una línea base para el monitoreo de la calidad y cantidad de hábitats de la trucha (Ruiz-Campos, 2013) así como la posibilidad de predecir la densidad y estructura poblacional a partir del conocimiento de los parámetros ambientales.

4. Hipótesis

Las unidades de hábitat presentes en los diferentes arroyos de la Sierra San Pedro Mártir (SSPM) poseen atributos estructurales (fisiográficos, fisicoquímicos e hidrométricos) y biológicos (biomasa de macroinvertebrados y cobertura de vegetación) que influyen en la densidad y estructura de talla de los individuos de la trucha endémica *Oncorhynchus mykiss nelsoni*.

5. Objetivos

5.1 Objetivo general

Caracterizar las unidades de hábitat en los arroyos de la Sierra San Pedro Mártir, Baja California, y evaluar su relación con la densidad y estructura poblacional de la trucha arcoíris endémica, *Oncorhynchus mykiss nelsoni*.

5.2 Objetivos específicos

5.2.1 Identificar y caracterizar las diferentes unidades de hábitat que ocupa la trucha arcoíris endémica, *O. mykiss nelsoni*.

5.2.2 Evaluar la densidad y estructura poblacional de la trucha en las diferentes unidades de hábitat, así como su relación con las variables ambientales (fisiográficas, hidrométricas y bióticas).

5.2.3 Generar información base sobre el estado actual de los hábitats y de las poblaciones de la trucha de San Pedro Mártir para futuros programas de monitoreo y de conservación de esta subespecie.

6. Materiales y métodos

6.1 Área de estudio

6.1.1 Localización

Este estudio se realizó en la Sierra de San Pedro Mártir (SSPM) que es un sistema de alta montaña localizado en el estado de Baja California (México) (latitud 30° 31' 12" a 31° 17' 24" N y longitud 115° 07' 48" a 115° 46' 48" O). Cuenta con una superficie de, aproximadamente, 342,800 hectáreas, de las cuales 62,000 conforman el Parque Nacional de San Pedro Mártir decretado como Área Natural Protegida en 1947 (CONANP, 2004).

6.1.2 Geomorfología

La SSPM constituye la formación batolítica más alta dentro de la cordillera peninsular. Esta última se localiza desde el sur de California, E.U.A, hasta el extremo sur de la península de Baja California (O' Connor y Chase, 1989). Las rocas ígneas que conforman dicho batolito son, en su mayoría, rocas tonalitas y granodioritas (Gastil et al., 1975; Silver y Chappell, 1988). Evidencias geológicas sugieren que el levantamiento del batolito de la SSPM hasta su posición actual inició hace unos 14 millones de años (Gastil et al., 1979; Morán-Zenteno, 1984; Barajas, 1991).

6.1.3 Hidrología

En la SSPM los arroyos principales que bajan con dirección al Océano Pacífico son, de norte a sur: San Rafael, San Telmo y Santo Domingo (Ruiz-Campos, 1991). Los arroyos de esta zona son perennes en sus cabeceras, pero intermitentes en sus cursos medios e inferiores durante la condición de sequía. Las desembocaduras

de todos estos arroyos se encuentran bloqueadas hacia el océano por la formación de bancos de arena, excepto durante eventos de inundaciones extremas posteriores a tormentas (Tamayo, 1962).

La mayoría de los arroyos son bastante someros y no sobrepasan los 50 cm de profundidad, registrándose algunas pozas de más de 150 cm, principalmente debajo de pequeñas cascadas. El potencial de iones de hidrógeno del agua drenada en estos sitios se caracteriza por ser ligeramente alcalina con pH de 7.7 a 8.3. El Arroyo San Rafael es uno de los que poseen valores promedio más altos de pH, alrededor de 8.3. La dureza del agua es variable entre los arroyos, siendo la concentración mayor de 185 ppm (promedio 23.9 ppm) y el calcio como el catión dominante (Ruiz-Campos, 1993).

Las localidades de muestreo fueron: Arroyo La Grulla, Arroyo San Antonio de Murillos y Arroyo de San Rafael. El Arroyo La Grulla se localiza a 2,035 msnm de altitud en la cabecera de la cuenca del Río Santo Domingo. Ruiz-Campos (1993) describió en este arroyo la presencia de pozas de mediana profundidad de 15 a 200 cm con abundantes macrófitas. La vegetación ribereña la constituye un bosque de coníferas dominado por *Pinus jeffreyi*.

El Arroyo San Antonio de Murillos recibe este nombre al confluir con el Arroyo de la Zanja (Ruiz-Campos, 1993). Pertenece a la cuenca del Río Santo Domingo, donde se ubica la localidad tipo de la trucha de San Pedro Mártir, el Rancho San Antonio (Evermann, 1908; Ruiz-Campos y Pister, 1995). Actualmente, esta localidad se encuentra con un elevado riesgo de que desvíen sus aguas por entubamiento para ser utilizadas en el riego agrícola de los valles de Camalú y Vicente Guerrero (Ruiz-Campos, 2016).

El Arroyo San Rafael pertenece a la cuenca del Río San Rafael que es el segundo sistema hidrológico más importante en la SSPM. Este arroyo es perenne en las zonas altas y medias de su trayectoria, con una anchura y profundidad promedio de 558 cm y 34 cm, respectivamente (Ruiz-Campos, 1993).

6.1.4 Climatología

El clima en la SSPM es de tipo Cbs', es decir sub-húmedo con precipitación principalmente invernal; semifrío, con temperatura media anual del orden de 7° C y con un promedio de intervalo diario de 10°C (Álvarez, 1985).

Un carácter distintivo de la SSPM es la asimetría climática entre la vertiente occidental y la oriental. La occidental presenta una clara influencia del Océano Pacífico que genera un aporte de nieblas en las tierras bajas, que da como resultado un clima mediterráneo de veranos secos y calurosos, e inviernos relativamente húmedos y fríos. La vertiente oriental, por su parte, recibe la influencia del clima árido proveniente del Golfo de California (Peinado et al., 1994).

El origen de las lluvias es de tipo orográfico, causadas por tormentas tropicales que entran al Golfo de California o al Océano Pacífico. También pueden ser causadas por frentes fríos de tormenta que se originan en el Golfo de Alaska, moviéndose en dirección sureste. La precipitación promedio anual es de 400 mm; no obstante, durante algunos años puede ser mayor a 1000 mm (Álvarez, 1985).

En la región de la SSPM es posible apreciar un gradiente de precipitaciones a través de la serie de estaciones situadas de oeste a este: Vicente Guerrero (Altitud [A]= 40 m; precipitación [P]= 163 mm); Santo Domingo (A= 160; P= 252); Santa Cruz (A=999; P= 304); y San Pedro Mártir (A= 2080; P= 518) (CLICOM, 2016).

6.1.5 Vegetación

La Sierra de San Pedro Mártir presenta dos tipos principales de vegetación: el chaparral de montaña y el bosque de coníferas (Wiggins, 1980; Delgadillo-Rodríguez, 1992). El chaparral de montaña se encuentra a partir de los 700 m de altitud, llegando hasta el bosque de coníferas en altitudes entre los 1200 y 1400 msnm, donde usualmente penetra en el bosque formando parte de los estratos inferiores del sotobosque (Delgadillo-Rodríguez, 1992).

La vegetación ribereña consiste en tres pisos o niveles de vegetación: (1) Piso superior, localizado en la parte más alta y estable del cañón del arroyo, que no es afectada por inundaciones o desbordamientos y permite la presencia de formas freatófilas (*Quercus agrifolia* en localidades debajo de 1,000 msnm); (2) Piso intermedio, localizado en la planicie de inundación y es anegado por el desbordamiento del arroyo en épocas de lluvias; es un piso de gran inestabilidad y es dominado por especies adaptadas a los efectos de las avenidas de agua, como son sauces (*Salix lasiolepis* y *S. laevigata*), alisos (*Platanus racemosa*), y álamos (*Populus fremontii*); y (3) Piso inferior o de banco, localizado en el banco del arroyo y está representado por la cola de caballo (*Equisetum hiemale*), el pasto de bando (*Muhlenbergia richardsoni*) y juncos (*Scirpus* sp., *Cyperus* sp. y *Juncus tiehmi*) (Ruiz-Campos, 1993, 2016).

La vegetación acuática (macrófitas) de la SSPM se encuentra poco representada y, principalmente, está presente en pozas grandes y de bajo flujo que poseen suficientes detritos como en el Arroyo La Grulla, donde se encuentran formas emergentes como el tule (*Typha domingensis*) y el berro de agua (*Rorippa nasturtium*), formas flotantes enraizadas (*Potamogeton natans*), formas flotantes libres como la lenteja de agua (*Lemna gibba* y *L. trisulca*) y formas sumergidas como *Berula erecta*, *Ceratophyllum demersum*, *Ranunculus aquatilis* y *R. hidrocharoides* (Ruiz-Campos, 1993, 2016) y otras como *Eleocharis acicularis*, *Cyperus leavigatus* y *Sagittaria cineata* (Delgadillo-Rodríguez, 1992).

6.2 Muestreos

Se realizaron siete muestreos en diferentes localidades de distribución de la trucha arcoíris de la Sierra de San Pedro Mártir:

- Arroyo La Grulla en La Grulla, fechas 26 al 28 de septiembre de 2014 y 8 al 19 de agosto de 2015.
- Arroyo San Antonio de Murillos en Rancho San Antonio, fechas 3 al 4 de mayo de 2014 y 12 al 13 de abril de 2015.
- Arroyo San Rafael en Rancho Mike's Sky, fechas 21 al 23 de febrero de 2014, 20 al 22 de marzo de 2015 y 22 al 24 de mayo de 2015.

6.3 Identificar y caracterización de unidades de hábitat

Se identificaron y caracterizaron las unidades de hábitat de la siguiente manera: se marcó un punto de inicio de transecto y se registraron las coordenadas geográficas, así como su altitud, y se realizó una prospección visual arroyo arriba (en dirección opuesta a la corriente del arroyo) colocando banderas a la orilla del río para delimitar topográficamente las distintas unidades de hábitat identificadas con base en los criterios de la USDA-USFS (1990). La evaluación de las unidades de hábitat fue realizada posterior a la captura de truchas con la finalidad de no interferir en la presencia de los individuos en cada unidad de hábitat a evaluar (Ruiz-Campos, 2013).

Los segmentos de arroyo delimitados variaron entre 169 y 779 metros en longitud, dependiendo de la fisiografía del lugar. Con los datos generados durante el inventario y caracterización de las unidades de hábitat, se realizaron mapas detallados de área de muestreo, así como de la secuencia y posición de las unidades de hábitat a través de esquemas de estimación de superficie (*sensu* Dolloff et al., 1993).

Para la tipificación del hábitat en los arroyos del área de estudio, se identificaron diez tipos diferentes de unidades (microhábitats), las cuales son agrupadas en tres categorías de macrohábitat: poza, corriente y rápido (ver descripción en Tabla 1 y Anexo 1).

Tabla 1. Descripción de los tipos de microhábitats registrados en los arroyos de la Sierra de San Pedro Mártir y las siglas utilizadas para su identificación.

POZA	Sigla	Sigla en español	Nombre	Descripción
		USDA USFS		
	BWP	PFI	Poza de flujo inverso formado por rocas	Se forma en el margen del canal por el flujo de agua alrededor de obstrucciones: rocas, raíces o restos de troncos. Zonas poco profundas (>0.35 m de profundidad máxima), con poca vegetación ribereña y con guijarros como sustrato dominante en el fondo.
	LSP	PEL	Poza de erosión lateral	Formada por el flujo que recae en las rocas que crean una obstrucción parcial del canal. La erosión asociada está confinada a menos del 60% del ancho del canal.
	DPL	PRN	Poza por represamiento natural	Agua incautada por un bloqueo completo o casi completo del canal ocasionado por desechos, escombros, rocas de deslaves, ramas o troncos.
	MCP	PEC	Poza de erosión central	Grandes pozas formadas por erosión al centro del canal. La fosa de erosión abarca más de 60% del diámetro del canal. La velocidad del agua es lenta y el sustrato es altamente variable.

Tabla 1 (Continuación).

POZA	PLP	PCA	Poza de caída	Se forma cuando el flujo de agua pasa sobre una obstrucción del canal completa o casi completa y cae abruptamente en el lecho del arroyo, excavando una depresión; usualmente es grande y profunda. El tamaño del sustrato es altamente variable.
	STP	PES	Pozas en escalón	Una serie de pozas separadas por pequeños rápidos o cascadas.
CORRIENTE	GLD	CFL	Corriente de flujo laminar	Fluye de velocidades bajas a moderadas, carente de turbulencias marcadas. El fondo del canal es amplio y uniforme, cuyo sustrato puede variar de cantos rodados, grava o arena.
	RUN	COR	Corriente	Fluye rápidamente sin obstáculos grandes para el flujo, con poca agitación en la superficie, a menudo aparece como rápidos inundados, el sustrato típicamente es grava, pero también pueden ser guijarros o rocas.
	SRN	COE	Corriente escalonada	Una secuencia de rápidos separados por escalones cortos, el sustrato es canto rodado y rocas.
RÁPIDO	LGR	RBG	Rápido de bajo gradiente	Secciones poco profundas fluyendo rápidamente, agua turbulenta con sustrato parcialmente expuesto generalmente dominado por guijarros. Gradiente <4%.

6.4 Caracterización ecológica del hábitat

6.4.1 Caracterización fisiográfica

En cada unidad de hábitat identificado se midió la longitud, anchura y profundidad, así como el tipo de sustrato dominante (e.g. canto rodado, grava, arena, limo). Se calculó la superficie cubierta por cada tipo de unidad de hábitat multiplicando la anchura promedio por la longitud de la unidad, la suma de las superficies de las unidades de hábitat constituyen el total de área escudriñada por muestreo. Asimismo, se midió la extensión y la inclinación de los bancos del arroyo, utilizando para esta última un clinómetro. Todas las mediciones antes descritas fueron basadas en Platts et al. (1983).

La profundidad de cada unidad de hábitat se determinó a través de una sección transversal del arroyo, midiendo la profundidad a intervalos de 50 cm. En estos mismos puntos se registró la velocidad de la corriente con el uso de un correntímetro Swoffer (precisión 0.01 m/s).

La descarga o flujo del arroyo (Q) se calculó con la ecuación descrita por Duff y Cooper (1976), como: $Q = [a * z * c] * v * f.c.$; donde: Q = tasa de descarga (m^3/s), a = anchura promedio (m), z = profundidad promedio (m), v = velocidad de corriente promedio (m/s), y f.c. = factor de corrección por la fricción del sustrato. Para las unidades con fondo arenoso se utilizó el factor de corrección de 0.9, mientras que para las de fondo de grava o canto rodado se utilizó un factor de 0.8. Todas las medidas fueron registradas en una bitácora *ad hoc* (Anexo 2).

6.4.2 Caracterización fisicoquímica del agua

En cada unidad de hábitat muestreada se midió, en al menos tres puntos de la misma, la temperatura ($^{\circ}C$), oxígeno disuelto (OD mg/l), porcentaje de oxígeno disuelto (O^2 %), potencial de iones de hidrógeno (pH), conductividad (mS/cm) y total de sólidos disueltos (TDS, g/l). Todas estas mediciones fueron realizadas con un multianalizador Hydrolab scout 2 (Hydrolab Co., Austin, Texas).

6.4.3 Factores bióticos

En cada unidad de hábitat la densidad de presas (macroinvertebrados bentónicos) se determinó con un nucleador de forma tubular para fondos de arroyo Wildco Hess, el cual tiene una cobertura de 858 cm². Este nucleador se coloca en el fondo del arroyo en dirección opuesta a la corriente. El sustrato obtenido se remueve manualmente y los invertebrados presentes se recolectan en una red de 500 µl de luz de malla colocada en la parte central del mismo nucleador. Las muestras de invertebrados se fijaron en etanol al 70%, se etiquetaron y transportaron al laboratorio para su identificación y cuantificación. La identificación de los invertebrados acuáticos se realizó con las claves de Pennak (1978) y Merritt et al. (2008). La biomasa de los invertebrados acuáticos fue medida en una balanza analítica. El porcentaje de cobertura vegetal en los bancos de los arroyos y de cobertura de macrófitas acuáticas se estimó visualmente (*sensu* Cornell et al., 2008; Ruiz-Campos, 2013).

6.5 Densidad de truchas y su estructura poblacional

Posterior a la delimitación de las unidades de hábitat se procedió a determinar la densidad de truchas en cada una de ellas con el equipo de pesca eléctrica Smith Root LR-24, examinando en forma de “zig-zag” el cauce del arroyo con dirección opuesta al flujo de agua para facilitar la recolecta y la obtención de los ejemplares paralizados por la descarga eléctrica. El voltaje de descarga eléctrica utilizado osciló entre 400 y 800 voltios, dependiendo de los niveles de conductividad y temperatura presentes en el agua, siguiendo las recomendaciones descritas en Bonar et al. (2009).

Para realizar la pesca eléctrica fue necesaria la participación de tres personas, una de ellas operando el equipo y dos colocadas atrás del operador con redes de mano para la captura de los individuos paralizados. Una vez capturadas las truchas en cada unidad de hábitat, éstas se contaron y colocaron en recipientes con agua para su recuperación. A cada individuo se le registró su longitud total (± 0.01 mm). Una vez terminado el proceso de medición se devolvieron las truchas a su unidad de hábitat de captura. Algunas de las unidades de hábitat incluidas en el inventario y caracterización de tipos de unidad de hábitat no fueron examinadas con pesca eléctrica al verse impedido dicho método por la fisiografía del arroyo (pozas profundas), por lo

que para fines de cálculos de superficie cubierta sólo fueron consideradas aquéllas donde se realizó este método.

Con el propósito de determinar la estructura de tallas de las truchas presentes en cada tipo de unidad de hábitat muestreado, se generaron grupos de edad mediante un análisis de progresión modal (Bhattacharya, 1967). Este análisis fue procesado con el programa FISAT II (FAO, 2005). Por su parte, la densidad de truchas en los diferentes tipos de unidades de hábitat se expresó como número de individuos capturados por m².

6.6 Análisis estadístico

Se utilizó una prueba de independencia χ^2 (Ji-cuadrada) para comparar los niveles o categorías de densidad de truchas entre las diferentes unidades de hábitat (Zar, 1999). Esta misma prueba fue utilizada para determinar si los niveles de densidad de truchas eran dependientes o no del intervalo de altitud. En aquellos casos en que el valor calculado de χ^2 fue significativo en la primera prueba (test), se determinó cuál de los tipos de unidad de hábitat era el que tenía mayor influencia, eliminando éste del análisis. Este procedimiento fue repetido hasta que la hipótesis fue aceptada y, por tanto, se formó un grupo homogéneo (Zar, 1999).

Para determinar si existían diferencias significativas en los parámetros fisiográficos y fisicoquímicos entre las fechas de muestreo para cada arroyo muestreado, se utilizaron pruebas no paramétricas (Kruskal-Wallis, 2013). La prueba U de Wilcoxon-Mann-Whitney fue utilizada para comparar los parámetros entre dos fechas de muestreo (prueba utilizada en Arroyo La Grulla y Arroyo San Antonio de Murillos), mientras que para comparar los parámetros entre tres fechas de muestreo se utilizó la prueba H de Kruskal-Wallis (prueba utilizada en Arroyo San Rafael).

Para establecer la(s) variable(s) que contribuye(n) a explicar la variación de abundancia (medida como densidad) y estructura de tallas de la trucha en los diferentes tipos de unidades de hábitat muestreados, se utilizó un análisis de componentes principales. Este análisis permite determinar e identificar el menor número de variables que explican de modo significativo la variación de los atributos arriba señalados. En

ambos casos las variables suplementarias fueron la abundancia (medida como densidad) y la talla de truchas. Los análisis estadísticos fueron realizados con el paquete estadístico Statistica versión 7 (Statsoft, Inc.).

7. Resultados

7.1 Caracterización fisiográfica e hidrométrica

7.1.1 Arroyo La Grulla

En el muestreo de septiembre de 2014 se cubrió una superficie de 1,060 m² del arroyo, y se registró una anchura promedio de 4.43 m, una profundidad máxima promedio de 0.17 m, una velocidad de corriente promedio 0.16 m/s y una descarga promedio de 0.054 m³/s. En el muestreo de agosto de 2015 se cubrió una superficie de 1,161 m² de arroyo y se registró una anchura promedio de 6.76 m, una profundidad máxima promedio de 0.40 m, una velocidad de corriente promedio 0.01 m/s y una descarga promedio 0.011m³/s. El sustrato dominante en ambos segmentos muestreados fue arena (Tabla 2). La descarga del arroyo fue significativamente distinta entre las dos expediciones de muestreo ($U=4$, $z= 2.19$, $P=0.028$). La velocidad y descarga registradas en el muestreo de agosto de 2015 fueron las más bajas en todos los sitios estudiados (Tabla 2).

7.1.2 Arroyo San Antonio de Murillos

En el muestreo de mayo de 2014 se cubrió una superficie de arroyo de 2,574 m² y se registró una anchura promedio de 6.46 m, una profundidad máxima promedio de 0.39 m, una velocidad de corriente promedio de 0.16 m/s y una descarga promedio de 0.135 m³/s. En abril de 2015 se examinó una superficie de 2,518 m² y se registró una anchura promedio 4.5 m, una profundidad máxima de 0.8 m, una velocidad de corriente promedio de 0.25 m/s y una descarga de 0.185 m³/s. El sustrato dominante en ambas expediciones de muestreo fue canto rodado (Tabla 2).

Las características fisiográficas e hidrométricas fueron diferentes entre fechas de muestreo, específicamente para el ancho del cauce ($U=88.5$, $z=2.27$, $P=0.028$), la longitud de la planicie de inundación ($U=98$, $z=-1.97$, $P=0.048$) y la velocidad de corriente ($U=84.0$, $z=-2.41$, $P=0.015$) (Tabla 2).

7.1.3 Arroyo San Rafael

En el muestreo de febrero de 2014 se cubrió una superficie de 2,834 m², registrándose una anchura promedio del arroyo de 4.0 m, una profundidad máxima promedio de 0.82 m, una velocidad promedio 0.36 m/s y una descarga promedio de 0.239 m³/s, siendo el sustrato dominante arena. En el muestreo de marzo de 2015 se cubrió una superficie total de 2,517 m², obteniendo una anchura promedio del arroyo de 2.92 m, una profundidad máxima promedio de 0.97 m, una velocidad de corriente promedio 0.34 m/s, una descarga de 0.220 m³/s, y un sustrato dominante de canto rodado. En el muestreo de mayo de 2015 se cubrió una superficie de 1248 m², con una anchura promedio del arroyo de 2.8 m, una profundidad máxima promedio de 0.55 m, una velocidad de corriente promedio de 0.45 m/s, una descarga 0.325 m³/s, y un sustrato dominante de arena (Tabla 2).

La comparación entre muestreos para las características fisiográficas e hidrométricas registró una diferencia significativa en el porcentaje promedio de inclinación de los bancos ($\chi^2=12.0368$, g.l.=2, P=0.0024), presentándose una mayor inclinación en el evento de muestreo de mayo de 2015 (md=31) en comparación con aquéllos de febrero de 2014 (md=17.75) y marzo de 2015 (md=17.25) (Tabla 2).

Tabla 2. Factores fisiográficos e hidrométricos de los arroyos de la Sierra de San Pedro Mártir, durante los muestreos realizados de febrero de 2014 a agosto de 2015 (media \pm desviación estándar y, en renglón inferior, rango)

Localidad	Fecha	Anchura (m)	Prof. Máx. (m)	Velocidad (m/s)	Descarga (m³/s)
La Grulla	26-09-2014	4.43 \pm 3.45 (0.80-10.10)	0.20 \pm 0.15 (0.10-0.51)	0.23 \pm 0.32 (0.01-0.75)	0.073 \pm 0.088 (0.010-0.186)
	8-08-2015	6.76 \pm 1.39 (5.39-8.76)	0.40 \pm 0.27 (0.19-0.82)	0.01 \pm 0 (0.01-0.01)	0.011 \pm 0.274 (0.004-0.019)
San Antonio	4-05-2014	6.46 \pm 0.38 (2.36-12.00)	0.39 \pm 0.25 (0.09-1.06)	0.26 \pm 0.16 (0.07-0.71)	0.165 \pm 0.170 (0.028-0.578)
	13-04-2015	4.50 \pm 1.80 (2.30-9.43)	0.20 \pm 0.09 (0.09-0.45)	0.25 \pm 0.13 (0.10-0.43)	0.18 \pm 0.23 (0.02-1.070)
San Rafael	22-02-2014	4.16 \pm 1.47 (2.83-6.40)	0.19 \pm 0.07 (0.12-0.29)	0.38 \pm 0.08 (0.29-0.47)	0.239 \pm 0.254 (0.058-1.229)
	21-03-2015	2.93 \pm 1.26 (1.30-6.25)	0.32 \pm 0.20 (0.11-0.97)	0.34 \pm 0.14 (0.15-0.80)	0.129 \pm 0.068 (0.046-0.292)
	23-05-2015	2.76 \pm 0.63 (1.85-3.55)	0.31 \pm 0.10 (0.14-0.55)	0.45 \pm 0.15 (0.15-0.78)	0.213 \pm 0.075 (0.119-0.375)

7.2 Factores fisicoquímicos.

Al comparar los parámetros fisicoquímicos de las diferentes fechas de muestreo en el mismo arroyo se encontraron diferencias para la temperatura promedio del agua, registrándose el valor más bajo (12.6 °C) en el Arroyo San Rafael en febrero de 2014, mientras que el valor más alto (25.2 °C) se registró en el Arroyo San Antonio de Murillos en mayo de 2014 (Tabla 3).

El valor promedio más bajo de pH (7.07) se registró en el Arroyo San Antonio de Murillos en agosto de 2015 y el más alto (9.98) en el Arroyo San Rafael en mayo de 2015 (Tabla 3). En lo que respecta a la comparación de los valores de oxígeno disuelto, el valor promedio más alto se registró en el Arroyo San Rafael en febrero de 2014 (11.62 mg/l) y el más bajo (4.39 mg/l) en el Arroyo La Grulla en agosto de 2015. Los valores de los parámetros de conductividad y TDS en los diferentes arroyos de muestreo se presentan en la Tabla 3. A nivel de fechas de muestreo en cada localidad, los valores de estos dos parámetros exhibieron una baja variación.

Tabla 3. Factores fisicoquímicos de los arroyos de la Sierra de San Pedro Mártir, durante los muestreos realizados de febrero de 2014 a agosto de 2015 (media \pm desviación estándar y, en renglón inferior, rango). El asterisco (*) denota que no se cuenta con el registro.

Localidad	Fecha	Temp (°C)	OD (mg/l)	Cond. (mS/cm)	pH	TDS
La Grulla	26-09-2014	17.51 \pm 1.25	5.45 \pm 1.09	1.92 \pm 0.065	8.68 \pm 0.32	0.141 \pm 0.007
	16:32-17:12	(15.60-18.57)	(3.75-6.58)	(0.045-0.229)	(8.08-8.96)	(0.136-0.155)
La Grulla	8-08-2015	17.74 \pm 0.88	4.39 \pm 0.34	0.188 \pm 0.200	8.70 \pm 0.17	0.141 \pm 0.043
	9:40-10:55	(15.60-19.12)	(3.98-4.81)	(0.045-0.222)	(8.08-8.96)	(0.136-0.155)
San Antonio	4-05-2014	25.24 \pm 4.06	6.42 \pm 1.42	0.3150 \pm 0.065	7.07 \pm *	0.141 \pm 0.043
	16:32-17:12	(18.50-28.00)	(4.46-8.79)	(0.310-0.330)	*	(0.136-0.155)
San Antonio	13-04-2015	17.30 \pm 1.94	5.34 \pm 0.46	0.136 \pm 0.048	8.76 \pm .33	0.133 \pm 0.065)
	9:40-10:55	(15.35-22.32)	(4.80-6.80)	(0.101-0.327)	(8.14-9.13)	(0.078-0.212)
San Rafael	22-02-2014	12.62 \pm 1.46	10.84 \pm 0.512	0.337 \pm 0.046	8.76 \pm 0.33	0.17 \pm *
	8:03-11:20	(10.40-15.80)	(9.73-11.62)	(0.161-0.360)	(8.70-10.3)	*
San Rafael	21-03-2015	17.50 \pm 1.40	6.08 \pm 0.22	0.270 \pm 0.083	8.44 \pm 0.27	0.138 \pm *0.008
	11:45-14:17	(15.60-19.70)	(5.50-6.37)	(0.170-0.300)	(8.10-9.00)	(0.120-0.150)
San Rafael	23-05-2015	15.77 \pm 0.84	6.82 \pm 0.74	0.283 \pm 0.001	9.98 \pm 0.12	0.187 \pm *.001
	10:18-14:45	(14.32-16.93)	(6.82-0.74)	(0.282-0.286)	(9.64-10.1)	(0.181-0.184)

7.3 Clasificación del hábitat

7.3.1 Arroyo La Grulla

En los muestreos de las unidades de hábitat de este arroyo se identificaron dos tipos de unidades de hábitat (poza de erosión central y corriente de flujo laminar) a través de un intervalo de altitud de 1,230 a 1,254 msnm. En el muestreo de septiembre de 2014, la superficie de poza de erosión central (939 m²) fue mayor que la de corriente de flujo laminar (121 m²). En agosto del 2015 las superficies de ambas unidades fueron muy similares, si bien la superficie de poza de erosión central (588 m²) superó a la de corriente de flujo laminar (574 m²) (Figura 1 y 2). Esta localidad fue la que presentó la menor heterogeneidad en tipos de unidad de hábitat.

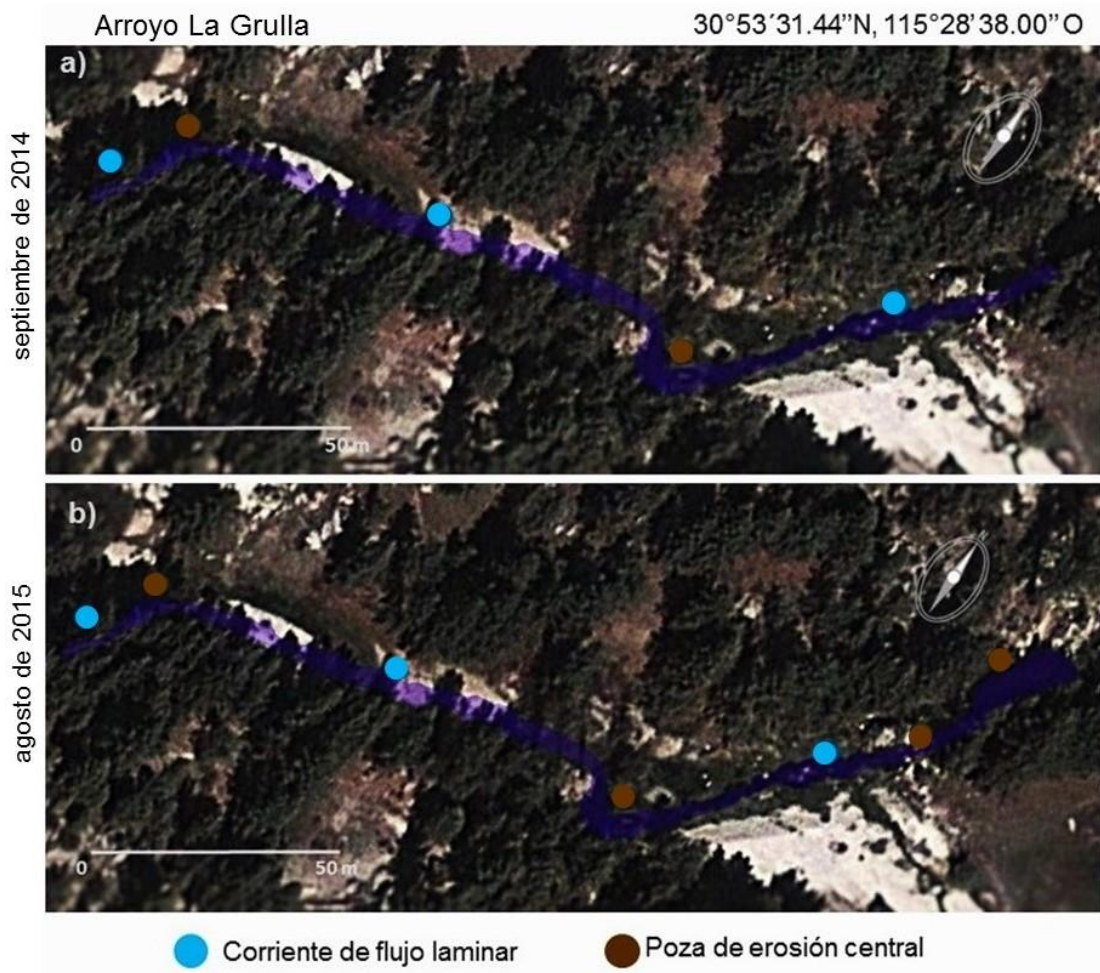


Figura 1. Imagen del área del segmento muestreado y los tipos de unidades de hábitat en el Arroyo La Grulla durante septiembre de 2014 (a) y agosto de 2015 (b).

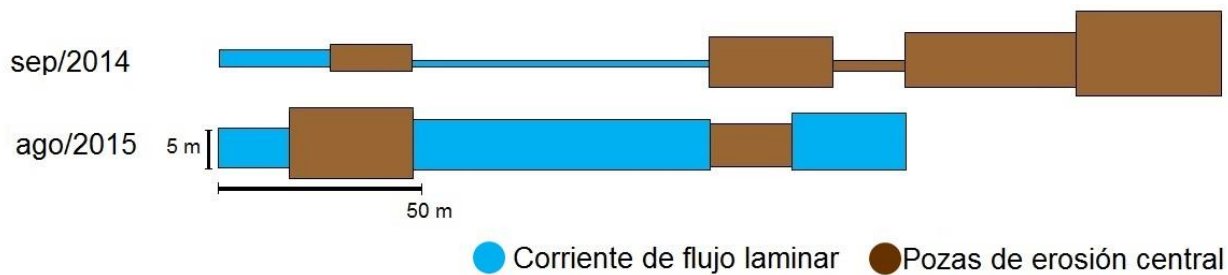


Figura 2. Esquema de superficie donde se representa el área estimada por tipo de unidad de hábitat en el Arroyo La Grulla, durante septiembre de 2014 y agosto de 2015.

A pesar de que las unidades de hábitat se mantuvieron en el mismo tipo de microhábitat en ambas fechas de muestreo (septiembre 2014 y agosto 2015), se registraron cambios en el área cubierta por los dos tipos de unidades de hábitat presentes. En septiembre de 2014 el porcentaje de área fue de 11% en corriente de flujo laminar y 89% en poza de erosión central. Por su parte, en agosto de 2015 el porcentaje de área cubierta fue de 49% en corriente de flujo laminar y 51% en poza de erosión central.

El porcentaje de cobertura por macrófitas en el arroyo cambió de 71% (septiembre de 2014) a 93% (agosto de 2015). Mayoritariamente estuvo constituida por formas enraizadas con estructuras reproductivas emergentes tales como el berro (*Berula erecta*). En la región media y más profunda del canal destacó la espiga de agua (*Potamogeton natans*), una forma enraizada con tallo sumergido y hojas flotantes. En la superficie del agua se encontraron formas flotantes como las lentejas de agua (*Lemna gibba* y *L. trisulca*). De manera cualitativa, este cambio en la cobertura de macrófitas acuáticas fue bastante notable (Figura 3). En esta localidad también se observó un incremento del 79% en la biomasa de macroinvertebrados bentónicos, de un valor de 12.46 g/m² en el muestreo de septiembre de 2014 a un valor de 22.23 g/m² en el muestreo de agosto de 2015.



Figura 3. Fotografías comparativas de los sitios de muestreo en el Arroyo La Grulla en septiembre de 2014 (a y c) y agosto de 2015 (b y d). Las fotografías en cada fila corresponden a los mismos sitios de muestreo.

7.3.2 Arroyo San Antonio de Murillos

La superficie muestreada de este arroyo se encuentra en un intervalo de altitud de 553 a 561 msnm. En el muestreo de mayo de 2014 se identificaron cuatro tipos de unidades de hábitat (de mayor a menor superficie): poza de erosión central (1,299 m²), corriente en escalón (627 m²), corriente (387 m²) y corriente de flujo laminar (260 m²). En el muestreo de abril de 2015 se identificaron y cuantificaron cinco tipos de unidades de hábitat: poza de erosión central (471 m²), corriente (412 m²), corriente en escalón (215 m²), pozas en escalón (145 m²) y rápido de bajo gradiente (111 m²) (Figura 4 y 5).

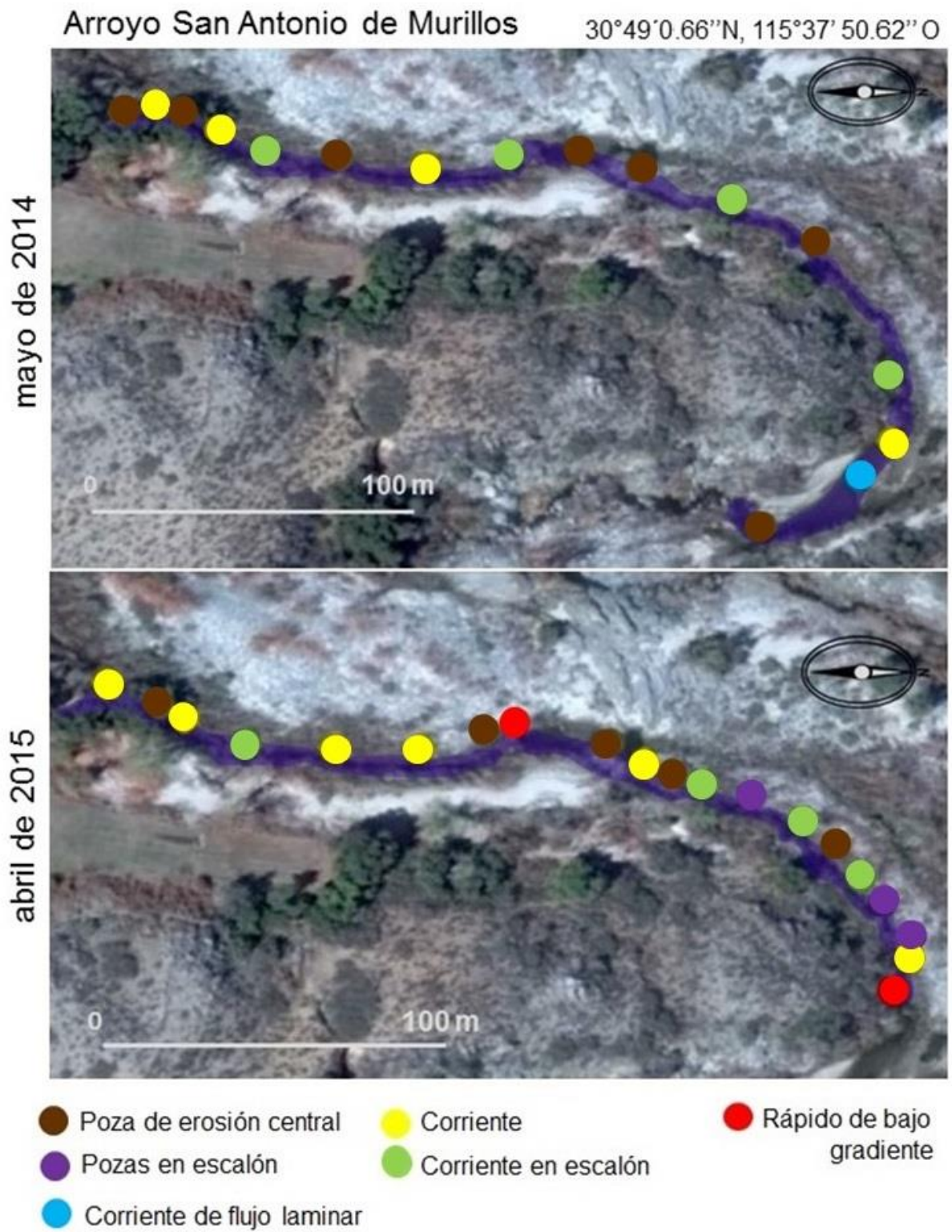


Figura 4. Imagen del área del segmento muestreado y los tipos de unidades de hábitat en el Arroyo San Antonio de Murillos durante mayo de 2014 y abril de 2015.

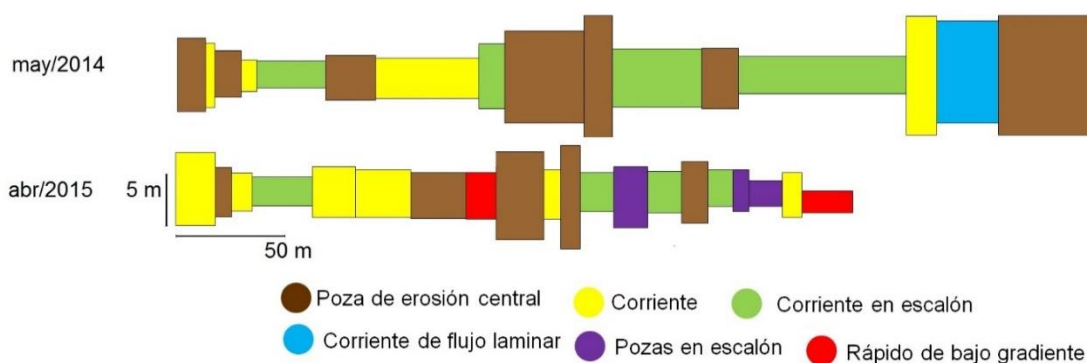


Figura 5. Mapa esquemático del área estimada de cada tipo de unidad de hábitat en Arroyo San Antonio de Murillos durante mayo de 2014 y abril de 2015.

La tipificación bajo la cual se identificó un mismo segmento del arroyo mostró una gran variabilidad; en el muestreo de mayo de 2014 se registró el tipo de hábitat de corriente de erosión central, estando ausente en el muestreo de abril de 2015. En este último muestreo se registraron dos tipos adicionales de unidades de hábitat que fueron pozas en escalón y corriente de bajo gradiente. La importancia de la superficie cubierta por tipo de unidad de hábitat fue distinta entre fechas de muestreo, si bien el tipo de poza de erosión central fue el que presentó el mayor porcentaje de superficie cubierta tanto en mayo de 2014 (51%) como en abril de 2015 (35%) (Tabla 4).

Tabla 4. Superficie cubierta en metros cuadrados y en porcentaje por cada tipo de unidad de hábitat en el Arroyo San Antonio de Murillos durante mayo de 2014 y abril de 2015

	Poza de erosión central	Pozas en escalón	Corriente	Corriente de flujo laminar	Corriente en escalón	Rápido de bajo gradiente	Total
Mayo de 2014							
Superficie m ²	1300	-	387	260	627	-	2574
Superficie %	51	-	15	10	24	-	100
Abril de 2015							
Superficie m ²	471	145	412	-	215	111	1354
Superficie %	35	11	30	-	16	8	100

En general, este arroyo presentó una escasa cobertura de macrófitas excepto en algunas pozas de erosión central, con un porcentaje menor al 20%. La biomasa de macroinvertebrados bentónicos exhibió un cambio muy dramático de un año a otro, de 4.43 g/m² en mayo de 2014 y 23.87 g/m² en abril de 2015. Esta biomasa registrada en abril fue la más alta registrada para todas las localidades y fechas de muestreo en el área de estudio.

7.3.3 Arroyo San Rafael

En el inventario de unidades de hábitat en el Arroyo San Rafael a lo largo de un intervalo de altitud de 1,218 a 1,254 msnm, se identificaron siete tipos de unidad de hábitat en un transecto de 714 m durante el muestreo de febrero de 2014. En esta fecha de muestreo, la superficie de cada unidad de hábitat fue la siguiente (de mayor a menor): corriente de flujo laminar (1,440 m²), corriente de bajo gradiente (438 m²), corriente en escalón (249 m²), poza de erosión central (198 m²), poza en escalón (195 m²), poza de erosión lateral (167 m²) y poza de caída (149 m²). En el muestreo de marzo de 2015, en un transecto de 779 m de longitud, se identificaron cinco tipos que por orden de importancia de superficie cubierta (m²) fueron: corriente de flujo laminar (939 m²), corriente (930 m²), pozas en escalón (286 m²), corriente en escalón (197 m²) y rápido de bajo gradiente (166 m²) (Figura 6 y Figura 7).

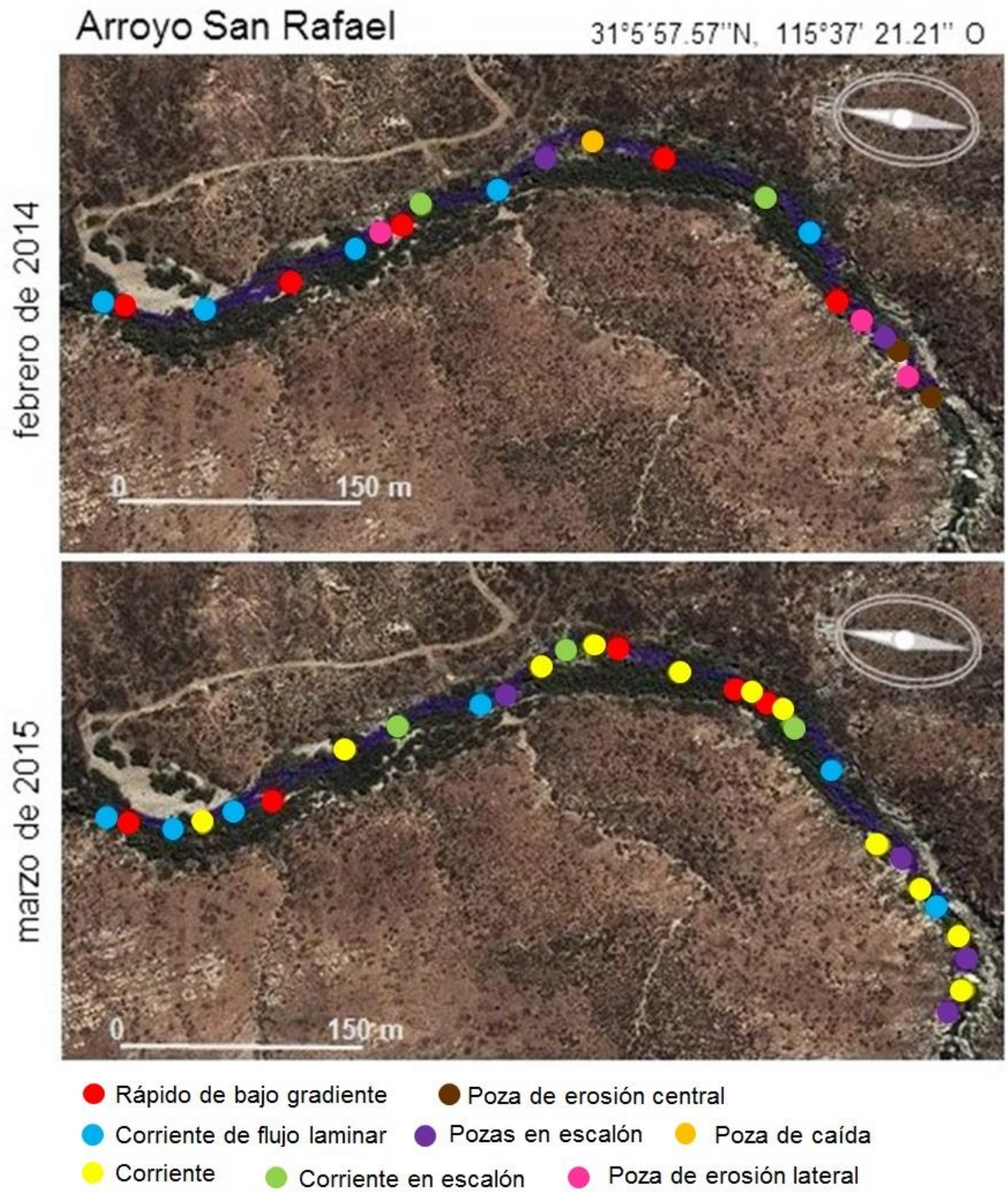


Figura 6. Imagen del área del segmento muestreado y los tipos de unidades de hábitat en el Arroyo San Rafael durante los muestreos de febrero de 2014 y marzo de 2015.

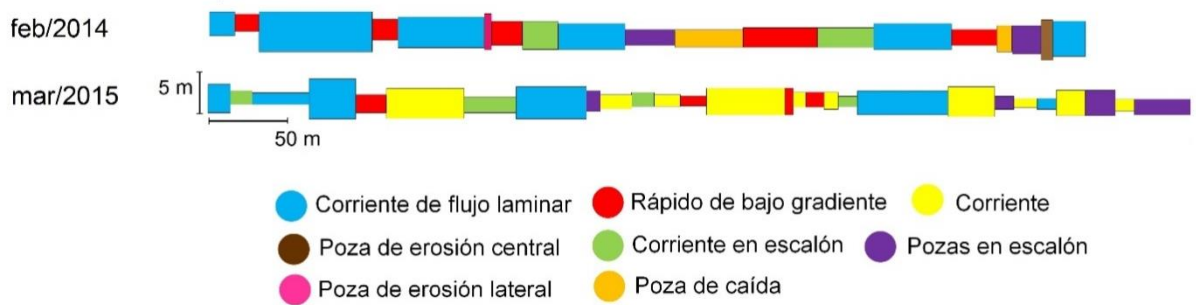


Figura 7. Esquema de superficie donde se representa el área estimada por tipo de unidad de hábitat en el Arroyo San Rafael (sitio 1) durante febrero de 2014 y marzo de 2015.

En el muestreo de mayo de 2015, en un transecto de 438 m, se identificaron siete tipos de unidades de hábitat (de mayor a menor superficie): corriente (998 m²), pozas en escalón (95 m²), corriente en escalón (72 m²), rápido de bajo gradiente (38 m²), poza de flujo inverso (18 m²), poza de represamiento natural (16 m²), y poza de caída (9 m²) (Figura 8 y Figura 9).

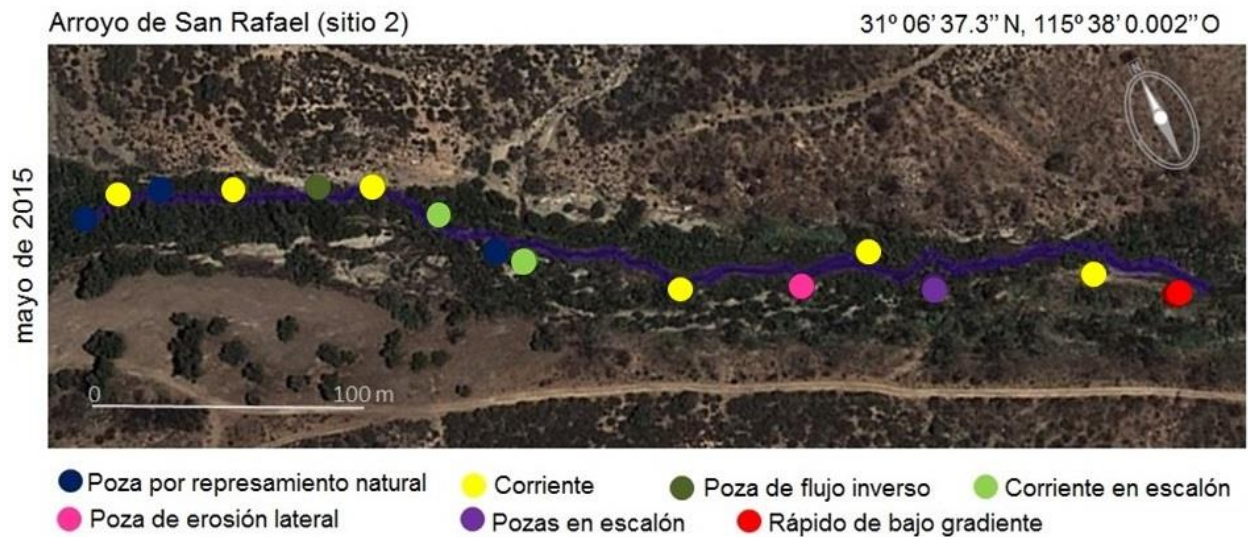


Figura 8. Imagen aérea del segmento muestreado y los tipos de unidades de hábitat en el Arroyo San Rafael (sitio 2), durante mayo de 2015.

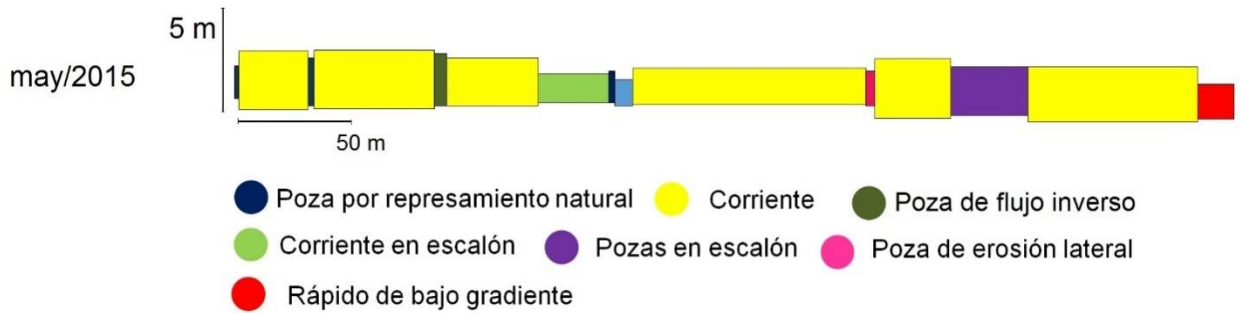


Figura 9. Esquema de superficie donde se representa el área estimada por tipo de unidad de hábitat en el Arroyo San Rafael (sitio 2) durante mayo de 2015.

La importancia en cobertura por tipo de unidad de hábitat cambió entre eventos de muestreo (Figura 10). Esta localidad fue la más heterogénea en tipos de unidad de hábitat, registrándose todos los tipos que se inventariaron para la Sierra San Pedro Mártir.

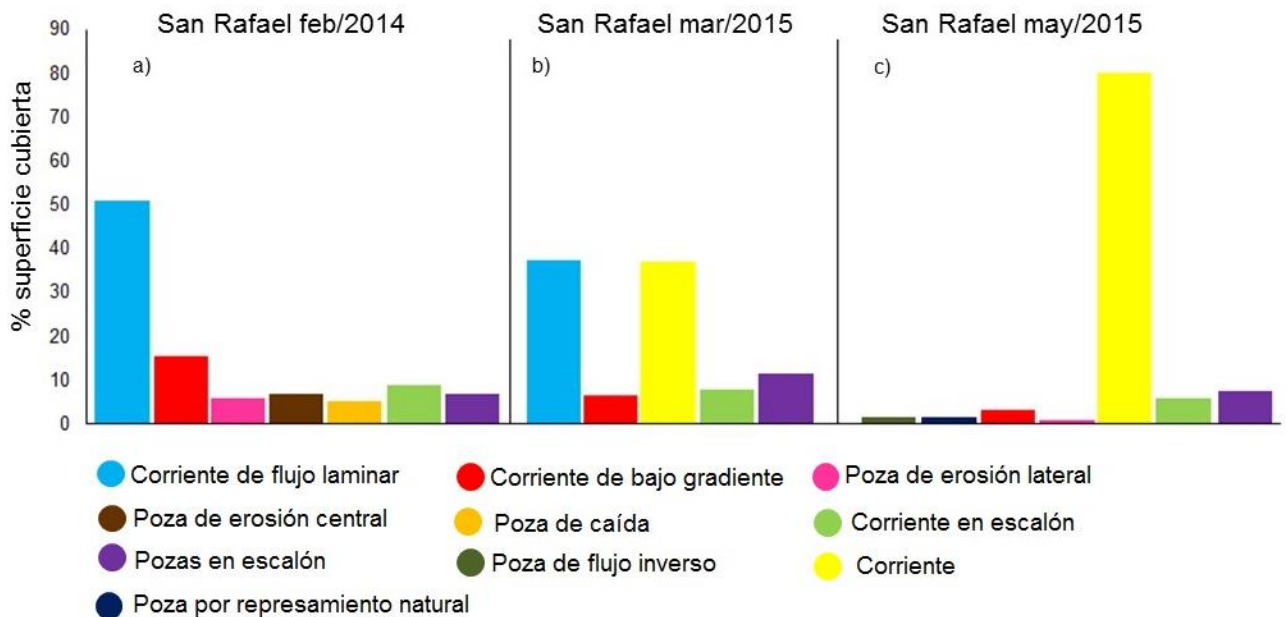


Figura 10. Porcentaje de superficie cubierta por tipo de unidad de hábitat en la localidad de Arroyo San Rafael, durante los muestreos de febrero de 2014 (a), marzo de 2015 (b) y mayo de 2015 (c).

La vegetación ribereña en el muestreo de febrero de 2014 se observó con escasa cobertura, mostrando un incremento del 17% en el año 2015 (Figura 11). La biomasa de macroinvertebrados bentónicos en los tres eventos de muestreo fue de 1.67 g/m^2 en febrero de 2014, 0.59 g/m^2 en marzo de 2015 y 15.81 g/m^2 en mayo de 2015.



Figura 11. Dinámica y cambios de vegetación en el Arroyo San Rafael. La imagen de la izquierda corresponde a febrero de 2014 (a, c, e) y la imagen de la derecha (b, d, f) a marzo de 2015.

7.4. Densidad de truchas

7.4.1 Arroyo La Grulla

En septiembre de 2014 se recolectaron 25 individuos en un transecto de 169 m de longitud (

Figura 12), con una superficie de 396 m² y una densidad poblacional de 0.063 individuos/m². La densidad de individuos fue mayor en la zona con corriente de flujo laminar (0.082) que en la poza de erosión central (0.055) (Tabla 5). En agosto de 2015 se recolectaron 75 individuos en un transecto de 169 m, con una superficie de 1,162 m² (Fig. 12) y una densidad poblacional de 0.065 individuos/m². La densidad de individuos fue mayor en la poza de erosión central (0.073) que en corriente de flujo laminar (0.056) (Tabla 5).

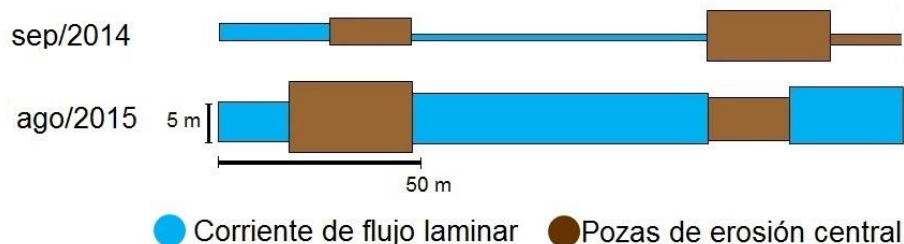


Figura 12. Representación de los tipos de unidades de hábitat presentes en el Arroyo La Grulla, muestreados para determinar la estructura y densidad poblacional de la trucha en septiembre de 2014 y agosto de 2015.

Tabla 5. Superficie cubierta, individuos y densidad poblacional de trucha por tipo de unidad de hábitat en

Fecha de muestreo	Superficie		Individuos		Densidad (Ind./m ²)
	(m ²)	(%)	(Num)	(%)	
Septiembre de 2014					
Poza de erosión central	275	69	15	60	0.055
Corriente de flujo laminar	121	31	10	40	0.082
Total	396	100	25	100	0.063
Agosto de 2015					
Poza de erosión central	588	51	32	43	0.073
Corriente de flujo laminar	573	49	43	57	0.056
Total	1161	100	75	100	0.065

el Arroyo La Grulla durante septiembre de 2014 y agosto de 2015.

7.4.2 Arroyo San Antonio de Murillos

En mayo de 2014 se recolectaron 33 individuos en un transecto de 332 m de longitud (Fig. 13), con una superficie de 1,665 m² y una densidad poblacional de 0.020 individuos/m². Las densidades fueron las siguientes (de mayor a menor): corriente en escalón (0.029), corriente (0.026) y poza de erosión central (0.011) (Tabla 6). En abril de 2015 se recolectaron 36 individuos en un transecto de 307 m de longitud (Fig. 13), con una superficie de 1353 m² y una densidad poblacional de 0.027 individuos/m². La densidad de individuos fue la siguiente: pozas en escalón (0.055), corriente en escalón (0.037), rápido de bajo gradiente (0.036), corriente (0.019) y poza de erosión central (0.017) (Tabla 6). La densidad de individuos por tipo de macrohábitat durante el muestreo de mayo de 2014 fue: corriente (0.0279) y poza (0.0112); mientras que en abril de 2015 fue: rápido (0.036), poza (0.026) y corriente (0.025).

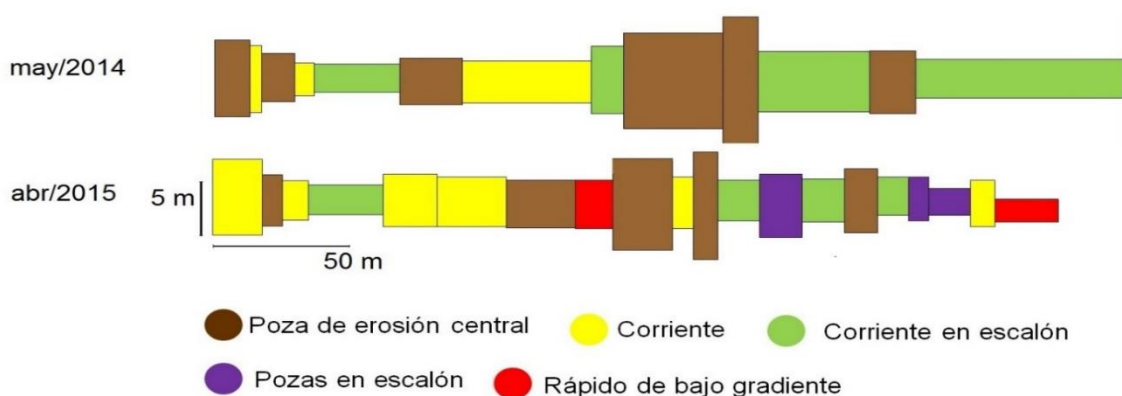


Figura 13. Representación de los tipos de unidades de hábitat presentes en el Arroyo San Antonio de Murillos, muestreados para determinar la estructura y densidad poblacional de trucha en mayo de 2014 y abril de 2015.

Tabla 6. Superficie cubierta, individuos y densidad poblacional de trucha por tipo de unidad de hábitat en el Arroyo San Antonio de Murillos durante mayo de 2014 y abril de 2015.

Fecha de muestreo	Superficie		Individuos		Densidad (Ind./m ²)
	(m ²)	(%)	(Num)	(%)	
Mayo de 2014					
Poza de erosión central	804	48	9	27	0.011
Corriente de flujo laminar	233	14	6	18	0.026
Corriente en escalón	627	38	18	55	0.029
Total	1664	100	33	100	0.020
Abril de 2015					
Poza de erosión central	470	35	8	22	0.017
Corriente	412	30	8	22	0.019
Corriente en escalón	215	16	8	22	0.037
Pozas en escalón	145	11	8	22	0.055
Rápido de bajo gradiente	111	8	4	11	0.036
Total	1353	100	36	100	0.027

7.4.3 Arroyo de San Rafael

En febrero de 2014 se recolectaron 117 individuos en un transecto de 218 m de longitud (Fig. 14), con una superficie de 1,097 m² y una densidad poblacional de 0.098 individuos/m² (Tabla 7). La densidad por tipo de unidad de hábitat fue la siguiente: rápido de bajo gradiente (0.151) y corriente de flujo laminar (0.091) (Tabla 7). En marzo de 2015 se recolectaron 6 individuos a lo largo de un transecto de 245 m del arroyo, cubriendo una superficie de 873 m² (Figura 14) y una densidad poblacional de 0.007 individuos/m² (Tabla 7). Por tipo de unidad de hábitat, la densidad de individuos fue: rápido de bajo gradiente (0.015), corriente de flujo laminar (0.008), corriente (0.007) y corriente en escalón (0.0) (Tabla 7). En mayo de 2015 se recolectaron 23 truchas en un segmento de 439 m, en el mismo transecto que se inventariaron unidades de hábitat (Fig. 9) con una superficie de 1,248 m² y una densidad poblacional de 0.018 individuos/m² (Tabla 7). La densidad de

truchas fue: poza de represamiento natural (0.124), poza de erosión lateral (0.1099), corriente (0.0160), corriente en escalón (0.0105), poza de flujo inverso (0) y rápido de bajo gradiente (0) (Tabla 7).

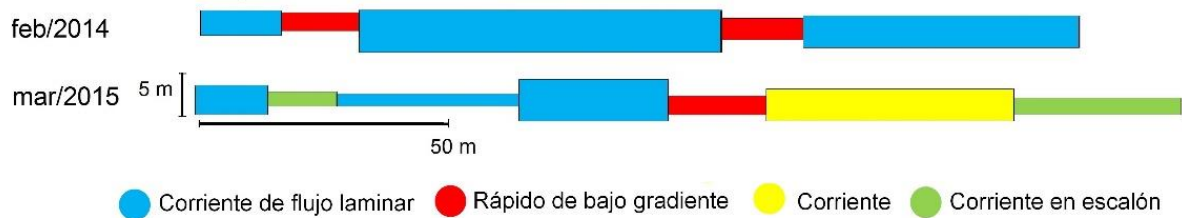


Figura 14. Representación de los tipos de unidades de hábitat muestreados en el Arroyo San Rafael, para determinar la estructura y densidad poblacional de truchas en febrero de 2014 y marzo de 2015.

La densidad de truchas por tipo de macrohábitat en febrero de 2014 fue: corriente (0.028) y poza (0.011); en marzo de 2015: rápido (0.036), poza (0.026) y corriente (0.025); y en mayo de 2015: poza (0.029), corriente (0.018) y rápido (0.0). Al analizarse los porcentajes de individuos capturados en función de la superficie de los macrohábitats muestreados, se registró una mayor representación en corriente en todas las fechas de muestreo: febrero de 2014 (84%), marzo de 2015 (90%) y mayo de 2015 (80%).

Tabla 7. Superficie cubierta, individuos y densidad poblacional de truchas por tipo de unidad de hábitat en el Arroyo de San Rafael durante febrero de 2014, marzo y mayo de 2015.

Fecha de muestreo	Superficie		Individuos		Densidad (Ind./m ²)
	(m ²)	(%)	(Num.)	(%)	
Febrero de 2014					
Corriente de flujo laminar	984	90	90	84	0.091
Rápido de bajo gradiente	113	10	17	16	0.151
Total:	1096	100	107	100	0.098
Marzo de 2015					
Corriente de flujo laminar	390	45	3	50	0.008
Rápido de bajo gradiente	65	7	1	17	0.015
Corriente	279	32	2	33	0.007
Corriente en escalón	139	16	0	0	0.0
Total:	873	100	6	100	0.007
Mayo de 2015					
Rápido de bajo gradiente	38	3	0	0	0.0
Corriente	998	80	16	70	0.016
Corriente en escalón	72	6	3	13	0.041
Pozas en escalón	95	8	1	4	0.011
Poza por represamiento natural	16	1	2	9	0.124
Poza de flujo inverso	18	1	0	0	0.000
Poza de erosión lateral	9	1	1	4	0.110
Total:	38	3	23	100	0.018

7.5 Estructura de tallas

7.5.1 Arroyo La Grulla

En septiembre de 2014, la longitud total (LT) mínima, máxima y promedio de los individuos de trucha fueron 62, 220 y 97 mm, respectivamente y en agosto de 2015, la longitud total mínima, máxima y promedio fueron 45, 115 y 83 mm, respectivamente. La LT promedio de las truchas fue estadísticamente similar entre los eventos de muestreo ($U=5.50$, $z=-1.4622$, $P=0.3832$). En septiembre de 2014, la estructura de tallas de la población total tiene dos clases de talla. El tipo poza de erosión central y corriente de flujo laminar presentan una clase de talla (Figura 15). En agosto de 2015, la población total presenta tres grupos modales, cuatro en poza de erosión central y dos en corriente de flujo laminar (Figura 16).

7.5.2 Arroyo San Antonio de Murillos

En mayo 2014 la LT mínima, máxima y promedio de las truchas fueron 50, 181 y 83 mm, respectivamente, la estructura de tallas de la población total y por unidad de hábitat estuvo representada por una clase de talla próxima a los 80 mm (Figura 17). En abril de 2015, las longitudes totales variaron de 52 a 210 mm, con un valor promedio de 117 mm, la población total presento tres clases de edad y se evidenció la ausencia de organismos entre los 75 y 134 mm, no se presentaron grupos de tallas en rápido de bajo gradiente y en pozas en escalón. Una clase de talla en poza de erosión central, corriente y corriente en escalón con medias de 71, 176 y 151 mm, respectivamente (Figura 18). La longitud promedio de las truchas fue estadísticamente distinta entre los muestreos ($U=63.5$, $z=-2.65$, $P=0.012$).

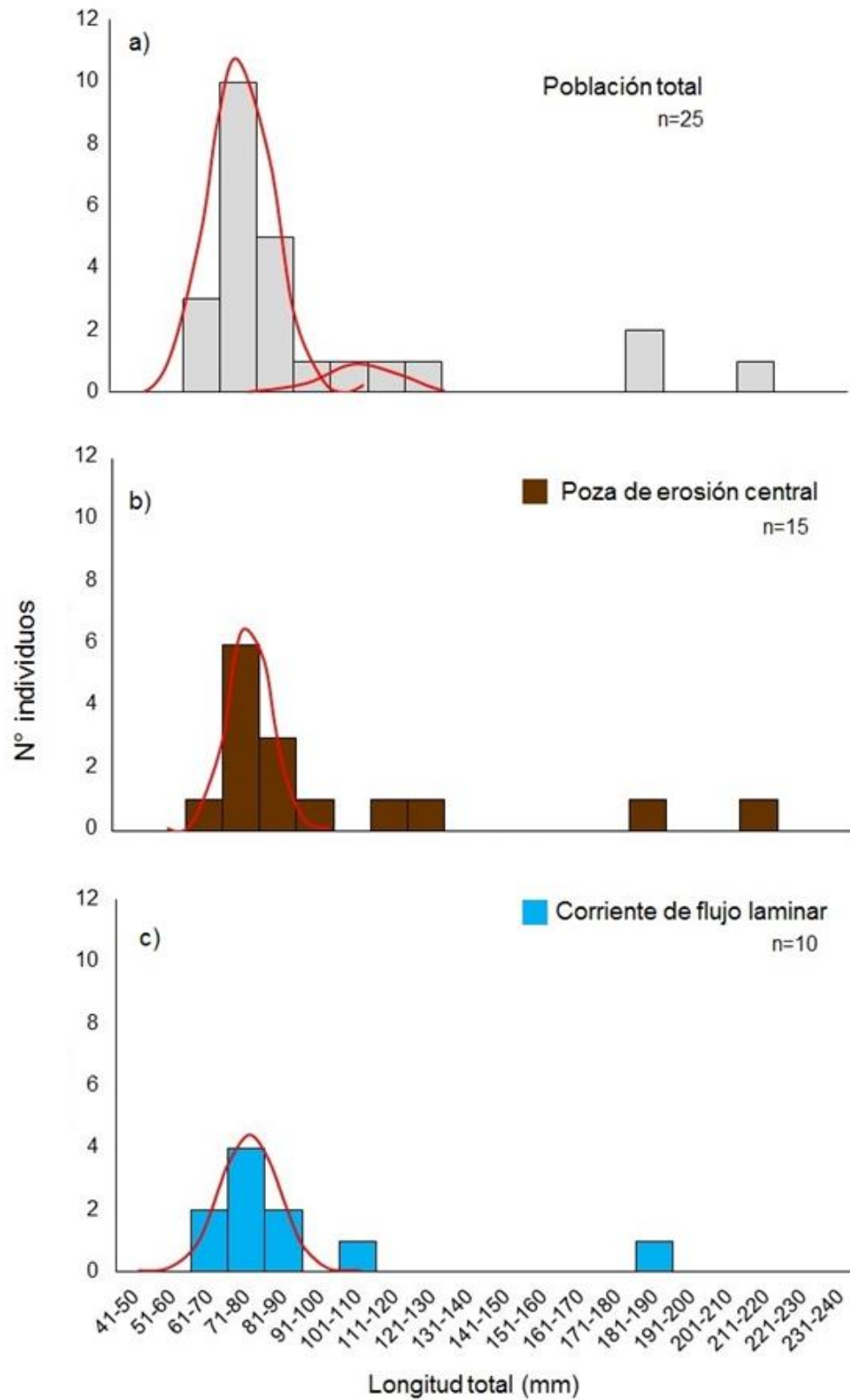


Figura 15. Estructura poblacional por frecuencias de tallas y las clases de edad de la trucha determinadas por el método de Bhattacharya en la localidad de Arroyo La Grulla durante el muestreo de septiembre de 2014.

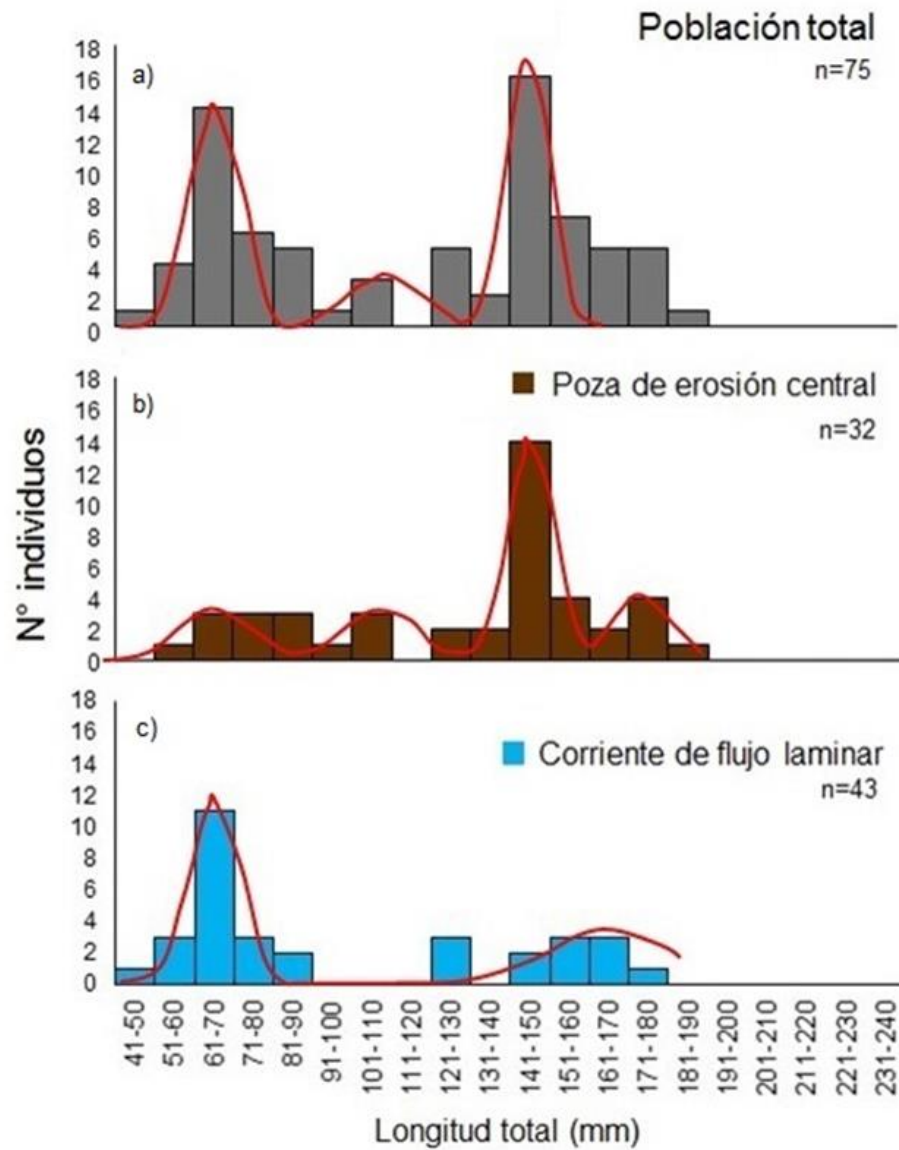


Figura 16. Estructura poblacional por frecuencias de tallas y las clases de edad de la trucha determinadas por el método de Bhattacharya en la localidad de Arroyo La Grulla durante el muestreo de agosto de 2015.

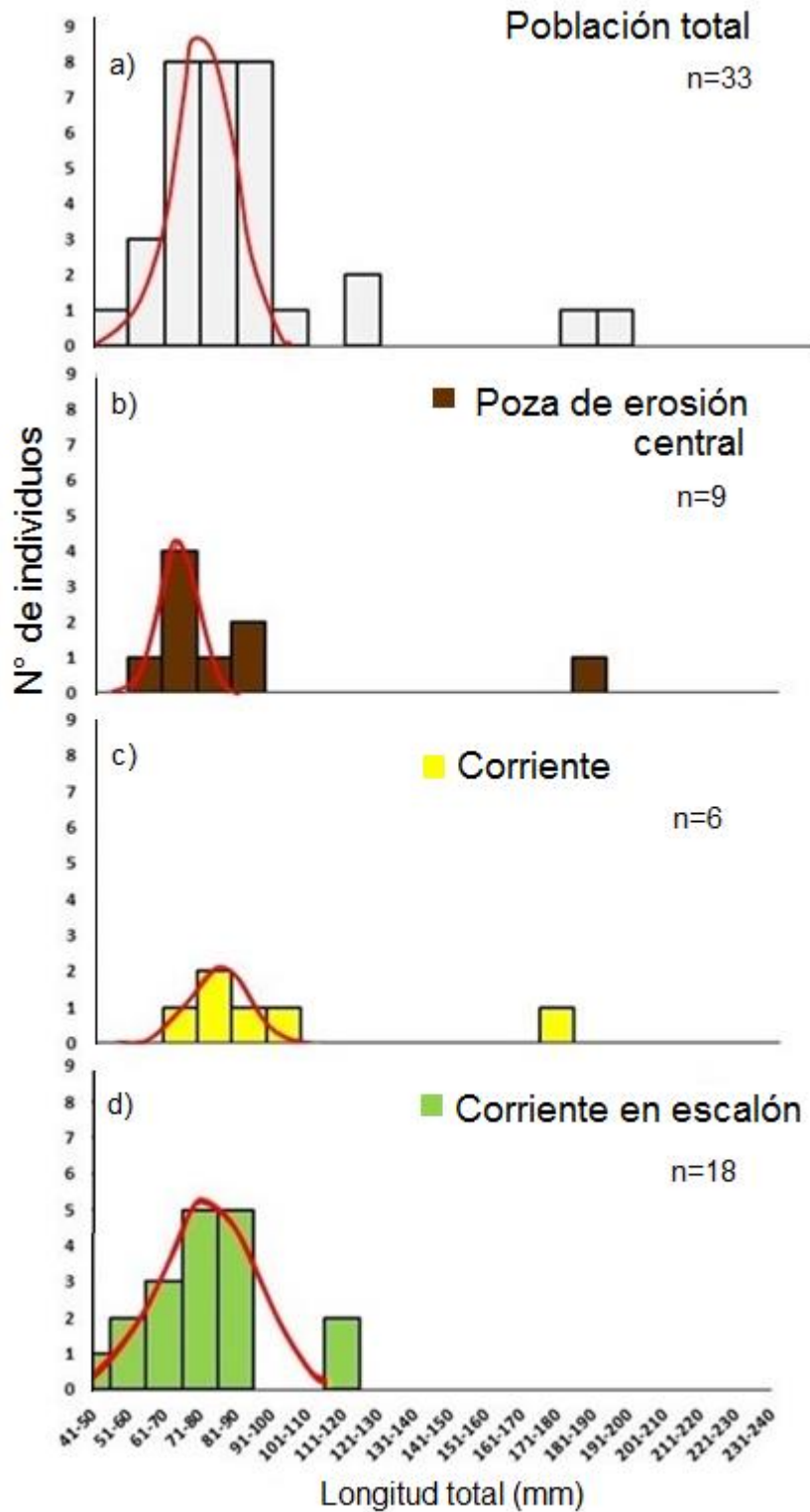


Figura 17. Estructura poblacional por frecuencias de tallas y las clases de edad de la trucha determinadas por el método de Bhattacharya en la localidad de Arroyo San Antonio de Murillos durante el muestreo de mayo de 2014.

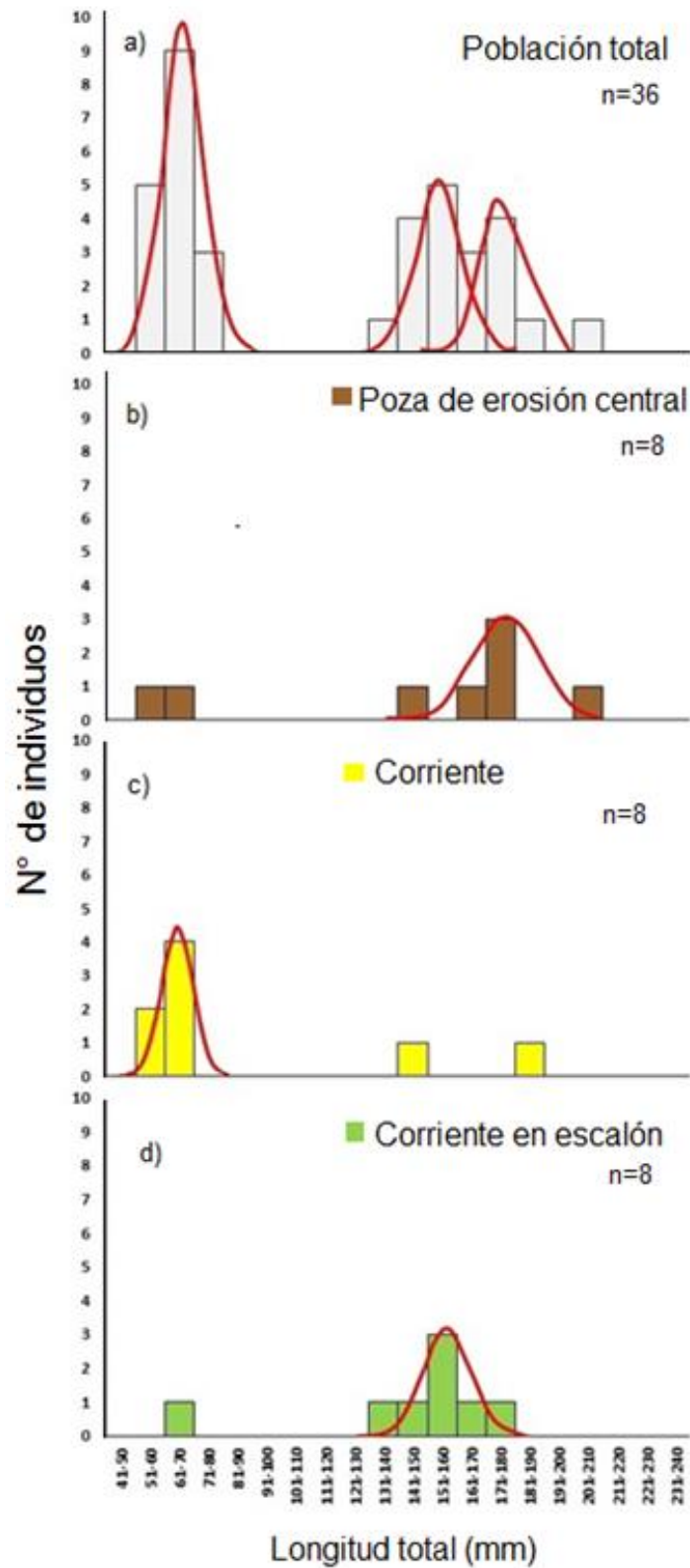


Figura 18. Estructura poblacional por frecuencias de tallas y las clases de edad de trucha determinadas por el método de Bhattacharya en la localidad de Arroyo San Antonio de Murillos durante el muestreo de abril de 2015.

7.5.3 Arroyo de San Rafael

En febrero de 2014, el intervalo de longitud total de la trucha fue de 60 a 216 mm, con un valor promedio de 109 mm. En marzo de 2015, la longitud total vario de 103 a 135 mm, con un valor promedio de 123 mm. En el muestreo de mayo de 2015, la longitud mínima, máxima y promedio fue, de manera respectiva, 62, 220 y 158 mm. La estructura de tallas de la población en febrero de 2014 estuvo compuesta por dos clases de talla, cuyas medias fueron de 75 y 109 mm de longitud total, dos clases de tallas en corriente de flujo laminar y una en rápido de bajo gradiente (Fig. 19). En los muestreos de marzo de 2015 (Figura 20 22) y mayo de 2015 no se formaron clases de tallas (Fig. 21).

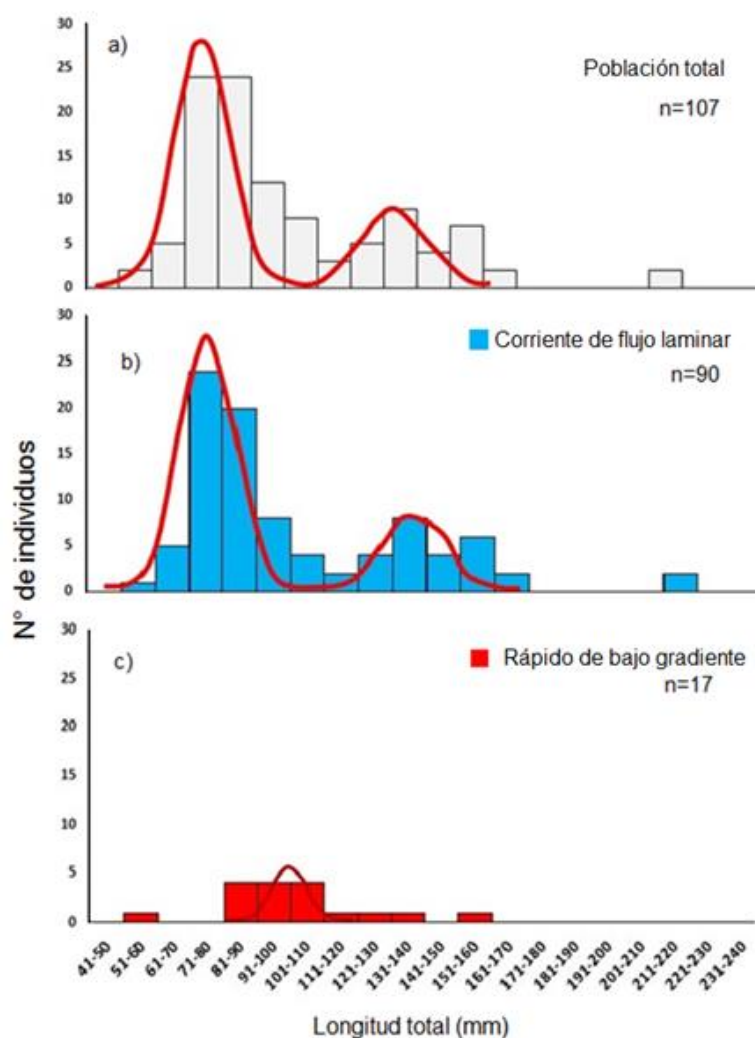


Figura 19. Estructura poblacional por frecuencias de tallas y las clases de edad de trucha determinadas por el método de Bhattacharya en la localidad de Arroyo San Rafael durante el muestreo de febrero de 2014.

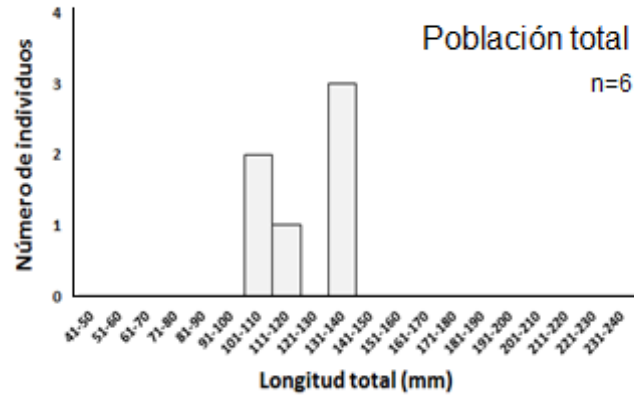


Figura 20. Intervalos de tallas en el Arroyo San Rafael durante el muestreo de marzo de 2015.

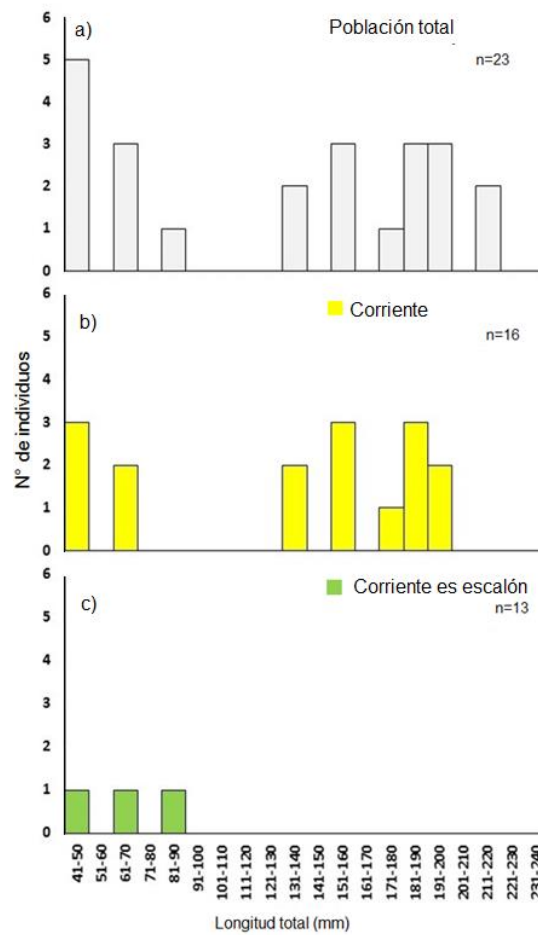


Figura 21. Intervalos de tallas para la población total (a) y para las unidades de hábitat de corriente (b) y corriente en escalón (c) en el Arroyo Rafael durante el muestreo de mayo de 2015.

7.6 Comparación de densidad de truchas por unidad de hábitat

La densidad de truchas fue significativamente distinta en los diferentes tipos de unidad de hábitat ($\chi^2 = 298.6$, 8 g.l., $P < 0.01$), por tipo de unidad de hábitat fue la siguiente: poza por represamiento natural (0.1235), poza de erosión lateral (0.1099), rápido de bajo gradiente (0.0794), corriente de flujo laminar (0.0677), pozas en escalón (0.0416), corriente en escalón (0.0352), poza de erosión central (0.0351), corriente (0.0172) y poza de flujo inverso (0). Por muestreo, las más altas densidades de individuos por tipo de unidad de hábitat se registraron en rápido de bajo gradiente (0.1505) y en corriente de flujo laminar (0.0914), en el Arroyo San Rafael durante febrero de 2014.

La superficie de cobertura (m^2) de las unidades de hábitat fue: poza de erosión central (2,137), corriente de flujo laminar (2,069), corriente (1,995), corriente en escalón (1,053), rápido de bajo gradiente (327), pozas en escalón (240), poza de flujo inverso (18), poza por represamiento natural (16) y poza de erosión lateral (9). Esta superficie mostró cambios en la misma localidad en años consecutivos. Algunos tipos, como corriente de flujo laminar, está representado en los arroyos La Grulla y San Rafael; sin embargo, este mismo tipo de unidad de hábitat no está representado en el Arroyo San Antonio de Murillos.

La biomasa de macroinvertebrados (g/m^2) fue síguela siguiente: Arroyo San Antonio de Murillos en abril de 2015 (23.87), Arroyo La Grulla en agosto de 2015 (22.32), Arroyo San Rafael en mayo de 2015 (15.81), Arroyo La Grulla en septiembre de 2014 (12.47), Arroyo San Antonio de Murillos en mayo de 2014 (4.43), Arroyo San Rafael en febrero de 2014 (1.67) y Arroyo San Rafael en marzo de 2015 (0.59).

7.7 Análisis de factores bióticos y abióticos por tipo de hábitat

El análisis de componentes principales aplicado a las variables estructurales del hábitat de la trucha de San Pedro Mártir durante los muestreos de febrero de 2014 a agosto de 2015, explicó a través de cinco ejes el 71.02 % de la variación total observada (Anexo 3). Las variables que más aportaron a la variación de la talla y abundancia de truchas son las relacionadas con la superficie del hábitat (Figura 22).

Por su parte, el análisis de factores principales para las variables fisicoquímicas de los arroyos de distribución de la trucha de San Pedro Mártir, explicó en tres ejes el 80% de la variación total observada (Anexo 3). Las variables que contribuyeron en mayor medida a la variación explicada de la abundancia (medida como densidad) de las truchas fueron el oxígeno disuelto y la salinidad, mientras que la talla se relacionó más con el pH y el total de sólidos disueltos (Figura 23).

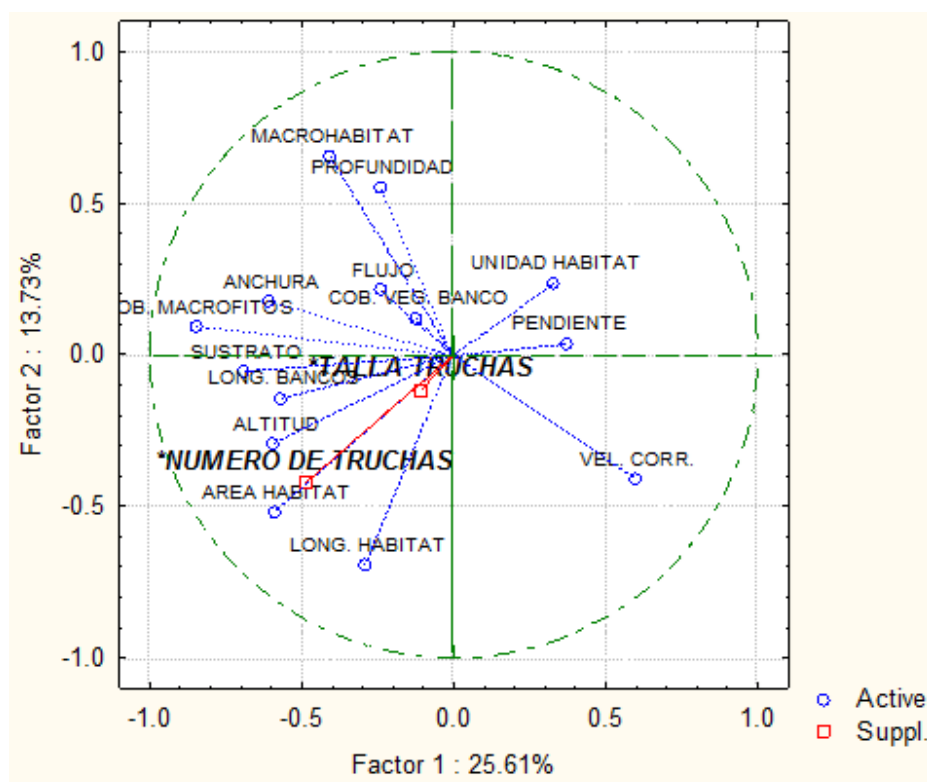


Figura 22. Mapa de la magnitud de las variables estructurales de hábitat en la variación explicada de la abundancia (densidad) de la trucha de San Pedro Mártir. La distancia desde el origen indica la magnitud. La distancia de separación entre líneas (activas) indica el grado de correlación entre ellas, cuanto más cercanas mayor es la correlación. Líneas opuestas indican una correlación negativa.

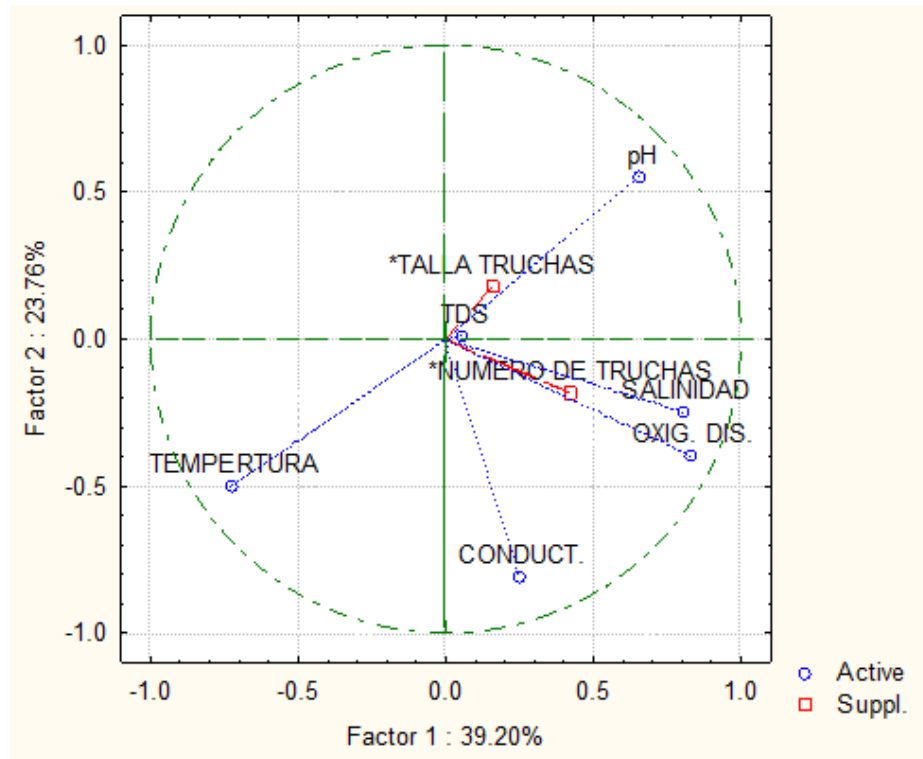


Figura 23. Mapa de la magnitud de las variables fisicoquímicas del hábitat en la variación explicada de la abundancia (densidad) de la trucha de San Pedro Mártir. La distancia desde el origen indica la magnitud. La distancia de separación entre líneas (activas) indica el grado de correlación entre ellas, cuanto más cercanas mayor es la correlación. Líneas opuestas indican una correlación negativa.

8. Discusión

8.1 Factores fisicoquímicos

Las características fisicoquímicas del agua en los arroyos de la Sierra San Pedro Mártir (SSPM) son dependientes de la dinámica de los factores meteorológicos y de la naturaleza química de las rocas de las áreas de drenaje (Ruiz-Campos, 1993). Los registros muestran una variación estacional y en cada arroyo de estudio, los cuales se encuentran ubicados en diferentes niveles de altitud. La temperatura más baja se presentó en invierno (12.6 °C) y la más alta en primavera (25.2 °C), pero no se realizaron muestreos en verano en donde se esperarían temperaturas más altas. El Arroyo de San Antonio de Murillos fue el que tuvo las temperaturas más altas (15 °C a 28 °C). Este arroyo se ubica a una altitud menor y los muestreos en el sitio fueron realizados en primavera (meses mayo y abril) lo cual podría explicar su temperatura mayor.

Como fuente primaria de comparación para el pH se cuenta con datos en el Arroyo de San Rafael (sitio 2) recolectados durante el periodo de febrero de 1989 a octubre de 1992 (Ruiz-Campos, 1993). En dicho estudio se registró una variación de pH promedio de 8.0 a 8.7, el cual es ligeramente menos alcalino que el registrado en el presente estudio de 8.4 a 9.98. El ligero incremento especialmente en el muestreo de mayo de 2015 (10.1) podría deberse al efecto de erosión de los bancos del arroyo por efecto del pisoteo por el ganado vacuno que utiliza estos sitios para pastar sobre la vegetación de los bancos y de la zona ribereña, lo cual ocasiona un mayor aporte de material terrígeno al canal del arroyo que incrementa la cantidad de cationes disueltos (Calcio y Magnesio) en el agua y, por ende, el pH.

El oxígeno disuelto mostro una variación de 3.98 (Arroyo La Grulla) a 11.72 (Arroyo San Rafael), los cuales se encuentran en los parámetros normales de hábitat de montaña de la especie (Ruiz-Campos, 1993; Matthews y Berg, 1997).

8. 2 Clasificación del hábitat

El único referente para una clasificación de hábitat en México mediante el uso de unidades de hábitat es la investigación realizada por Ruiz-Campos (2008) que contempla siete tipos de unidades en el Arroyo Ureyna, el cual está ubicado en la cabecera de la cuenca del Río Conchos (Chihuahua). Tres de esas unidades de hábitat no se registraron en el presente estudio: lámina de manto rocoso (BRS), poza de erosión lateral con manto rocoso (LSPbe) y poza de erosión lateral bordeada con peñas (LSPbo), en los arroyos de la Sierra de San Pedro Mártir son el manto rocoso nunca llega a presentarse como un sustrato dominante y en las zonas en que se presenta es en pequeños parches por lo cual no puede considerarse como un microhábitat.

En el Arroyo La Grulla (localidad La Grulla), se había caracterizado el hábitat como pozas de poca profundidad (Ruiz-Campos, 1993) sin embargo, en el presente estudio se encontró que las pozas como macrohábitat estuvieron separadas por zonas de corriente, añadiendo un mayor detalle a la caracterización fisiográfica. Las fotografías comparativas de una de las pozas principales de este mismo sitio entre los veranos de 1990 y 2015 denotan una disminución significativa en el nivel del agua pero se carece de datos puntuales que permitan realizar una comparación cuantitativa (Figura 24).



Figura 24. Poza en la localidad de La Grulla en años diferentes: a) septiembre de 1991 (Ruiz-Campos, 1993), y b) agosto de 2015 (este estudio). Se observa que el nivel del arroyo que drena a la poza disminuyó notablemente.

En la localidad San Antonio de Murillos se registró un hábitat conformado en su mayoría por corrientes que alternan con pozas. En el muestreo de abril de 2015 se identificaron dos rápidos aledaños a pozas. El referente fotográfico del sitio (Needham, 1938) y los datos fisiográficos generados en el presente estudio indican un cambio significativo en la fisiografía y flujo de este arroyo (Figura 25). Sin contar con un referente

cuantitativo cuando se compararon cualitativamente las fotografías, se aprecia una menor cobertura vegetal de los bancos en 1938.

El sitio 2 del Arroyo San Rafael fue descrito por Ruiz-Campos (1993) como un arroyo con pozas profundas de hasta 2 m, alternadas con corrientes; en este trabajo se observa que las zonas de corrientes fueron extensas y divididas por pequeñas pozas, con una profundidad máxima de 0.6 m. Las pozas como macrohábitat representaron sólo el 17% de la superficie total del arroyo.

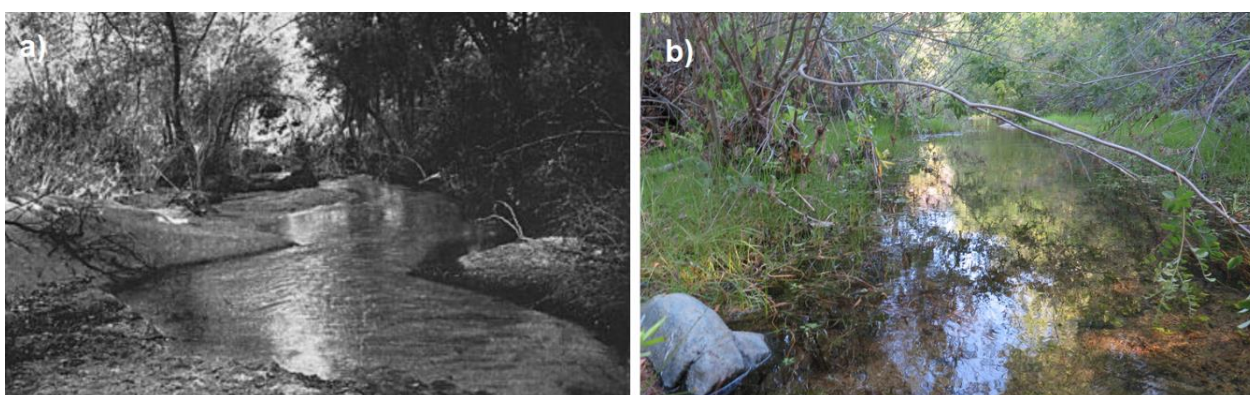


Figura 25. (a) Arroyo San Antonio de Murillos en 1936 (Needham, 1938), y (b) Arroyo San Antonio de Murillos en mayo de 2015 (este estudio).

La información generada en el presente estudio para las unidades de hábitat en los arroyos de distribución de la trucha de San Pedro Mártir, representa una línea base para el monitoreo de la cantidad y calidad de hábitat de esta trucha endémica, así como un referente de comparación con otros sistemas de arroyos con poblaciones nativas de trucha arcoíris en Norteamérica (Bjornn y Reisser, 1991; Knapp y Dudley, 1990; Decker y Erman, 1992).

8. 3 Densidad de truchas

En el Arroyo La Grulla la abundancia de truchas aumento de un año a otro (de 25 truchas a 75 truchas) pero no así la densidad de truchas la cual presentó poca variación entre muestreos, siendo de 0.063 individuos/m² en septiembre de 2014 y 0.065 individuos/m² en agosto de 2015. En el Arroyo San Antonio de Murillos se registró previamente una densidad de truchas de 0.185 individuos/m² en octubre de 1995 (Ruiz-Campos, 2016), mientras que en los muestreos del presente estudio en abril de 2014 y mayo de 2015, las densidades fueron bastante más bajas (0.020 y 0.026 individuos/m², respectivamente). No se cuenta con un registro previo de los parámetros ambientales en San Antonio de Murillos por lo cual no se puede hacer una inferencia de a que se deba esta fluctuación en las densidades poblacionales pero la abundancia se encuentra dentro de los registros en el sitio, 5-37 individuos/200 m (Ruiz-Campos et al., 2014) por lo cual resulta una fluctuación normal.

El Arroyo San Rafael fue anteriormente descrito con una densidad de truchas de 0.023-0.088 individuos/m² en el periodo de marzo del 1987 a agosto de 1989, con un promedio de 0.047 individuos/m² (Ruiz-Campos, 1993; Ruiz-Campos y Pister, 1995). En este estudio, la densidad de truchas estimada osciló entre 0.007 individuos/m² (marzo 2015) y 0.098 individuos/m² (febrero de 2014), es posible que la alta densidad de truchas se deba a las crecidas del arroyo lo cual se refleja en una mayor descarga en febrero de 2014 (0.239 m³/s) que fue casi el doble de la descarga en 2015 (0.129 m³/s). La densidad en marzo de 2015 de 0.007 individuos/m² es incluso inferior las que se presentan posteriores a eventos de incendios.

En términos generales, aunque la densidad de truchas registró variaciones entre las localidades de muestreo y dentro de cada localidad, se puede afirmar que la densidad de individuos se ha mantenido relativamente estable al menos durante los últimos 28 años (1987 a 2015).

8. 4 Estructura de tallas

En el Arroyo La Grulla no fue posible comparar la estructura de tallas de la población de trucha *O. mykiss nelsoni* con aquella previamente reportada por Ruiz-Campos (1993) para el periodo de marzo a septiembre

de 1990, debido a la diferencia en los métodos de recolecta empleados. Dicho autor utilizó un arte de pesca selectivo para la recolección de ejemplares (caña de pescar y red de cuchara) y en el presente estudio se utilizó la pesca eléctrica, método considerado de baja selectividad y apropiado en sistemas de arroyos de montaña (Vincent, 1971; Reynolds y Kolz, 2012). El intervalo de tallas registrado en este estudio en el Arroyo La Grulla durante septiembre de 2014 y agosto de 2015 fue de 45-220 mm de longitud total (LT), el cual es similar al registrado por Ruiz-Campos (1993) para esta misma localidad (55-273 mm de LT; 48-232 mm de longitud patrón) de marzo a septiembre de 1990.

En el Arroyo San Antonio de Murillos durante el muestreo de mayo de 2014 las truchas midieron entre 50 y 181 mm de LT, con una talla promedio de 83 mm que corresponde con individuos juveniles del año (cf. Ruiz-Campos, 1993). Asimismo, en el muestreo de abril de 2015, el intervalo de tallas osciló entre 52 y 210 mm LT. Los registros previos en esta misma localidad reportaron un intervalo de tallas entre 69 y 173 mm de LT para octubre de 1995 (Ruiz-Campos, 2016).

En el Arroyo San Rafael, específicamente en el sitio 2, la población no presentó grupos de talla definidos, estando el intervalo comprendido entre 60 y 220 mm LT. Este intervalo de tallas fue muy similar al reportado por Ruiz-Campos (1993) (55-273 mm LT para esta misma localidad entre enero de 1987 y agosto de 1989).

La estructura de tallas fluctúa poblacional y estacionalmente, en el presente estudio todas las localidades comparten dos grupos modales cercanos a los 70 y 140 mm de LT. No obstante, en el Arroyo San Antonio de Murillos se forma un tercer grupo cercano a los 176 mm. No existe una segregación de tallas por tipo de unidad de hábitat excepto en el Arroyo San Antonio de Murillos en el muestreo de abril de 2015 donde se presenta un grupo modal en el tipo corriente con un media de 71 mm, y un grupo modal en tipo poza de erosión central y corriente de flujo laminar con medias de 176 mm y 151 mm, respectivamente.

8.5 Frecuencia de truchas en los macrohábitats y unidades de hábitat

Las densidades más altas de truchas en los arroyos de estudio en la SSPM correspondieron a aquellos hábitats de presencia rara y de poca superficie cubierta, siendo éstos pertenecientes al macrohábitat de poza. Ruiz-Campos (1993) señaló que las truchas tienen una preferencia por pozas, lo cual se reflejaba en

una mayor abundancia en este tipo de hábitat sin embargo no es un patrón ya que sólo se presentó un mayor porcentaje de truchas en macrohábitat de poza en arroyo La Grulla en septiembre de 2014. En el arroyo San Antonio de Murillos (localidad Rancho San Antonio), en el muestreo de mayo de 2014, la mayor densidad se obtuvo en la unidad de hábitat de corriente en escalón (55%) y en el macrohábitat de corriente (73%). La especie ha presentado una preferencia por sitios en el arroyo relativamente abiertos (con poca cobertura) y con corriente rápida (Cunjak y Green 1983; Baltz et al., 1991) lo cual es concordante con lo aquí presentado. La mayor densidad de truchas en unidades de hábitat de poza (poza por represamiento natural y poza de erosión lateral) puede ser explicada ya que estas zonas son utilizadas como refugios temporales (Baltz et al., 1991).

La selección de hábitat de *O. mykiss* cambia con el tamaño del individuo, a medida que va creciendo prefiere sitios con mayor profundidad y velocidad de corriente (Baltz y Moyle, 1984; Moyle y Baltz, 1985; Baltz et al., 1991) al realizar un análisis de estructura de tallas por tipo de unidad de hábitat esta tendencia se presentó de manera clara en Arroyo San Antonio de Murillos (abril de 2015) con truchas más grandes en pozas de erosión central y juveniles de un año en hábitat de corriente.

8. 6 Análisis de factores bióticos y abióticos por tipo de unidad de hábitat

La disponibilidad de hábitat es uno de los tres mecanismos de organización poblacional más comunes, junto con la limitación de recursos y la depredación (Wynne-Edward, 1962; Grossman, 1982; Grossman et al., 1982; Menge y Sutherland, 1987). En hábitats de ríos templados, los patrones de precipitación suelen ser muy variables (Poff y Ward, 1989), por lo que la biota puede estar sometida a fuentes de mortalidad que son relativamente impredecibles (Grossman et al., 1982). En estos ríos templados, las variaciones en la disponibilidad de recursos no juegan un papel tan fuerte en la regulación de la población, tal como ocurre en hábitats estacionalmente más estables (Grossman et al., 1998).

Lo señalado anteriormente concuerda con lo encontrado en esta investigación, donde el área de microhábitat (en algunos estudios cuantificada como disponibilidad de hábitat) tiene un alto valor explicativo cuando se asocia con variables suplementarias de abundancia y talla de truchas. La abundancia de truchas

en los arroyos tiene una alta correlación con los patrones hidrológicos (Grossman et al., 1998), lo cual nos hace inferir que una disminución en los niveles de flujo o descarga del arroyo tendría como consecuencia una reducción en la superficie del hábitat y en el número de truchas presentes.

Otra variable que mostró un alto valor explicativo en el presente estudio fue el potencial de hidrógeno (pH). Cabe mencionar que no se trata de una correlación espuria, ya que el Arroyo San Rafael (con la más alta densidad de truchas) presenta un pH promedio más alto en comparativa con los arroyos de La Grulla y San Antonio de Murillos.

8.7 Recomendaciones sobre manejo y conservación

El hábitat actual de la trucha de San Pedro Mártir es considerado como bien conservado (Ruiz-Campos, 2016). Uno de los factores que inciden en ello es la lejanía que tienen las localidades de distribución de esta trucha endémica con los asentamientos humanos y la dificultad de acceso a las mismas. Sin embargo, en los años recientes, el impacto antropogénico por actividad agrícola se ha venido incrementando de manera significativa en los valles costeros de Colonet, San Telmo, Camalú y Vicente Guerrero, los cuales demandan suministros de agua para los cultivos, que son aportados por pozos construidos en los lechos de los arroyos en la parte baja de las cuencas. Esta situación podría complicarse en el eventual aprovechamiento del agua de las localidades de distribución actual de la trucha, como sería el caso del Arroyo San Antonio de Murillos (Rancho San Antonio), ubicado a 530 metros sobre el nivel del mar. Por tanto, es fundamental que a corto plazo se tomen las medidas de prevención adecuadas para la conservación integral de los hábitats donde se distribuye esta trucha y otras formas acuáticas nativas.

El presente estudio funge como una línea base para el futuro monitoreo de la densidad poblacional de la trucha de San Pedro Mártir y de la calidad y cantidad de sus hábitats, siendo esta fuente de información indispensable para elucidar los posibles factores ambientales que modulan la densidad poblacional. Es por ello que el monitoreo permitirá conocer los patrones de abundancia de la trucha a mediano y largo plazo, por lo cual se recomienda que mediante el método aquí descrito se lleven a cabo inventarios de las unidades de hábitat y de la densidad poblacional, al menos, cada tres años (Hunter, 1990).

Las consideraciones y recomendaciones para la conservación y el manejo de la trucha de San Pedro Mártir son: 1) Proponer al Arroyo de San Antonio de Murillos como una zona de conservación. Ésta es la localidad tipo de la especie y, al encontrarse fuera de los límites territoriales del Parque “Sierra de San Pedro Mártir” no posee ningún tipo de protección. Además, se debe considerar como un reservorio de germoplasma (Ruiz-Campos, 1993). 2) Prohibir la introducción de especies exóticas en los arroyos de la SSPM, ya que éstas compiten por los recursos, espacio y alimentación con las especies nativas (Taylor, 2004; Rubidge y Taylor, 2005), o incluso hibridación en el caso de especies congénéricas o conespecíficas que ocasiona la pérdida de la diversidad genética (Rhymer y Simberloff, 1996; Camarena-Rosales et al., 2008). Todas éstas son algunas de las consecuencias negativas de tales introducciones. 3) Evitar las actividades de ganadería en las zonas ribereñas de los cuerpos de agua ya que el ganado modifica la morfología de los arroyos por el pisoteo. Esto, sumado al efecto de ramoneo sobre la vegetación de los bancos y de la planicie de inundación, promueve la erosión de los bancos que provoca el asolvamiento del canal y la reducción de la profundidad del arroyo. Asimismo, estos disturbios generan condiciones desfavorables para las truchas, ya que incrementan la temperatura y disminuyen la tensión de oxígeno disuelto del agua (Marcus et al., 1990; Contor y Platts, 1991). 4) Prohibir la construcción de caminos o brechas dentro o adyacentes a los ambientes ribereños, ya que estas acciones promueven la erosión y alteración del hábitat (flujo, cobertura, morfología, hidrología) (Marcus et al., 1990). 5) impedir la construcción de obras hidráulicas en los arroyos de distribución de la trucha de San Pedro Mártir, ya que alteran los regímenes de flujo y temperatura, además de cambiar el patrón del flujo de nutrientes en el arroyo (Marcus et al., 1990).

La conservación del hábitat de la trucha de San Pedro Martir es indispensable y crítico para la estabilidad de sus poblaciones. Es recomendable que la información aquí generada sea utilizada como una línea base para el monitoreo poblacional y del hábitat de esta trucha, como parte de un plan de conservación integral de las cuencas hidrológicas donde se distribuye esta subespecie endémica.

9. Conclusiones

- Los arroyos de la Sierra de San Pedro Mártir (SSPM) donde se distribuye la trucha endémica *Oncorhynchus mykiss nelsoni*, muestran cambios en sus factores ambientales (geográfica y temporalmente) que reflejan sistemas hidrológicos heterogéneos y altamente dinámicos.
- En los arroyos de la SSPM existen diez tipos de unidades de hábitat, bajo el sistema de tipificación para salmónidos de la USDA-USFS, en tres tipos de macrohábitat (poza, corriente y rápido), pero hubo diferencia notable entre los tres arroyos estudiados en cuanto al número de unidades en cada uno (2, 6 y 10). Las unidades de hábitat más importantes en cobertura fueron corriente de flujo laminar (Arroyo San Rafael) y poza con erosión central (Arroyos La Grulla y San Antonio de Murillos).
- La densidad de truchas (individuos/m²) estimada en el presente estudio en la SSPM fue relativamente similar entre fechas de muestreo en los arroyos La Grulla (0.063 vs 0.065) y San Antonio de Murillos (0.020 vs 0.027), pero muy cambiante en el caso del Arroyo San Rafael (0.007 vs 0.098).
- La densidad de esta trucha en los arroyos de estudio es actualmente similar a registros de hace 20 años, a pesar de que los niveles de flujos de los arroyos han disminuido significativamente desde entonces.
- La variación de la talla de las truchas está principalmente explicada por el pH y el total de sólidos disueltos.

Literatura citada

- Allen, A. E. (1968). Fish Populations of a trout stream in relation to major habitat zones and channel alterations. *Transactions of the American Fisheries Society*, 97(4), 389-397.
- Alvarez, M. Climatología de la Sierra San Pedro Mártir. Desert Fishes Council. Death Valley, California, E.U.A. Pister, E. P. (Ed). 1985. 13: 331-342. Impreso
- Bain, M. B. and Stevenson N. J. (1999). *Aquatic Habitat Assessment. Aquatic Habitat Assessment*. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland. E.U.A. 136 p.
- Baltz, D. M., and P. B. Moyle. (1984). Segregation by species and size class of rainbow trout (*Salmo gairdneri*) and Sacramento sucker (*Catostomus occidentalis*) in three California Streams. *Environmental Biology of Fishes*, 10(1),101-110.
- Baltz, D. M., Vondracek, B., Brown, L. R., and Moyle, P. B. (1991). Seasonal changes in microhabitat selection by rainbow trout in a small stream. *Transactions of the American Fisheries Society*, 120(2), 166-176.
- Barajas, A. M. Sierra de San Pedro Mártir: Crecimiento de un gigante. III Semana de la exploración y la historia: San Pedro Mártir. Ensenada, México. Lazcano C. (Ed). 1991. 27-28. Impreso
- Behnke, R. J. (1992). *Native trout of western North America*. American Fisheries Society Monograph 6. 275 p.
- Behnke, R. (2010). *Trout and salmon of North America*. Simon and Schuster. E.U.A. 363 p.
- Bell, M. C. (1986). *Fisheries handbook of engineering requirements and biological criteria*. U.S. Army Corps of Engineers, Office of the Chief of Engineers, Fish Passage Development and Evaluation Program, Portland, Oregon. E.U. A. 350 p.
- Begon, M., Harper, J. L. y Townsend, C. R. (1999). *Ecología: individuos, poblaciones y comunidades*. Ed. Omega. Barcelona, España. 886 p.
- Bhattacharya, C. G. (1967). A simple method of resolution of a distribution into Gaussian components. *Biometrics*, 23(1), 115-135.
- Bjornn, T. C. (1971). Trout and salmon movements in two Idaho streams as related to temperature, food, stream flow, cover, and population density. *Transactions of the American Fisheries Society*, 100 (3), 423-438.
- Bjornn, T. C. (1978). Survival, production, and yield of trout and chinook salmon in the Lemhi River, Idaho.

University of Idaho, College of Forestry. *Wildlife and Range Science Bulletin* 27.

- Bjornn, T. C. and Reisser, D. W. (1991). *Habitat requirements of salmonids in streams*. 83-138 p. En: Influences of forest and rangeland management on salmonid fishes and their habitats. American Fisheries Society Special Publications 19.
- Bonar, S. A., Hubert, W. A. and Willis, D. W. (2009). *Standard methods for sampling North American freshwater fishes*. Arizona Cooperative Fish and Wildlife Research Unit. American Fisheries Society. Bethesda, Md, E.U.A. 335 p.
- Bryant, B. D., Wright, B. E. and Davies, B. J. (1992). *Application of a hierarchical habitat unit classification system: stream habitat and salmonid distribution in ward creek, Southeast Alaska*. Gen. Tech. Rep. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. E. U. A. 18 p.
- Camarena-Rosales, F., Ruiz-Campos, G., De La Rosa-Vélez, J., Mayden, R. L., Hendrickson, D. A., Varela-Romero, A. and García de León, F. J. (2008). Mitochondrial haplotypes variation in wild trout populations (Telesotei: Salmonidae) from Northwestern Mexico. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 18(1), 33-45.
- Campbell, R. F., and Neuner, J. H. (1985). Seasonal and diurnal shifts in habitat utilized by resident rainbow trout in western Washington Cascade Mountain streams. In *Proceedings of the Symposium on Small Hydropower and Fisheries*. 39 p.
- Carlander, K. D. (1969). *Handbook of freshwater fishery biology*. Volume I. The Iowa State University Press, Ames. E.U.A. 752 p.
- CLICOM (2016). Base de datos climatológica nacional. Recuperado el 16 de enero de 2015 de <http://clicom-mex.cicese.mx/>.
- CONANP (2004). Sierra de San Pedro Mártir, Parque Nacional. Recuperado el 24 de septiembre de 2015 de: http://www.conanp.gob.mx/anp/san_pedro_martir/san_pedro.php
- Contor, C. R. and Platts, W. S. (1991). *Assessment of cowfish for predict trout populations in grazed watersheds of the intermountain west*. General Technical Report Int-278. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service Intermountain Research Station. 28 p.
- Cordone, A. J. and Kelley, D. W. (1961). The influences of inorganic sediment on the aquatic life of streams. *California Department of Fish and Game*, 47, 189-228.
- Cornell, J. E., Gutiérrez, M., Wait, A. D. and Rubio-Arias, H. O. (2008). Ecological characterization of a riparian corridor along the Río Conchos, Chihuahua, Mexico. *Southwestern Naturalist*, 53 (1), 96-100.

- Crisp, D. T., Mann, R. H. K. and McCormack, J. C. (1974). The populations of fish at Cow Green, Upper Teesdale, before impoundment. *Journal of Applied Ecology*, 11 (3), 969-996.
- Cunjak, R. A., and Green, J. M. (1983). Habitat utilization by brook char (*Salvelinus fontinalis*) and rainbow trout (*Salmo gairdneri*) in Newfoundland streams. *Canadian Journal of Zoology*, 61(6), 1214-1219.
- Chapman, D. W. (1966). Food and space as regulators of salmonid population in streams. *American Naturalist*, 100 (913), 345-457.
- Church, M. and Rood, K. M. (1983). *Catalogue of alluvial river channel regime data*. Department Geology University British Columbia, Vancouver, Canadá. 99 p.
- Davies, B. and Bromage, N. (2002). The effects of fluctuating seasonal and constant water temperatures on the photoperiodic advancement of reproduction in female rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Aquaculture*, 205(1), 183-200.
- Davis, G. E., Foster, J., Warren, C. E. and Doudoroff, P. (1963). The influence of oxygen concentration on the swimming performance of juvenile Pacific salmon at various temperatures. *Transactions of the American Fisheries Society*, 92(2), 111-124.
- Davies, W. M. (1989). The geographical cycle. *Geographical Journal*, 14(5), 481-504.
- Decker, L. M. and Erman, D. C. (1992). Short-term seasonal changes in composition and abundance of fish in Sagehen Creek, California. *Transactions of the American Fisheries Society*, 121(3), 297-306.
- Delgadillo-Rodriguez, J. (1992). *Florística y ecología del norte de Baja California*. Universidad Autónoma de Baja California, México. 355 p.
- Dolloff, C. A., Hankin, D. G., and Reeves, G. H. (1993). *Basinwide estimation of habit at and fish populations in streams*. USFS Southeastern Forest Experiment Station, Carolina del Norte, E.U.A. (SE-83), 25 p.
- Duff, D. A. and Cooper, J. L. (1976). *Techniques for conducting stream habitat survey on national resource land*. Bureau of Land Manage. Technical note 283. 72 p .
- Evermann, B. W., Jordan, D. S. and Grinnell, J. (1908). Descriptions of a new species of Trout (*Salmo nelsoni*) and a new Cyprinodont (*Fundulus meeki*): with notes on other fishes from Lower California. *Biological Society of Washington*, 21, 19-30.
- FAO. (2005). Food and Agriculture Organization. Programa de cómputo FISAT II www.fao.org.
- Gastil, R. G., Phillips, R. P. and Allison, E.C. (1975). Reconnaissance geology of the State of Baja California. *Geological Society of America Memoirs*, 140, 1-201.

- Gastil, R. G., Krummenacher, D. and Minch. J. (1979). The record of Cenozoic volcanism around the Gulf of California. *Geological Society of America Memoirs*, 90(9),839-857.
- Gonia, T. M., Keefer, M. L., Bjornn, T. C., Peery, C. A., Bennett, D. H. and Stuehrenberg, L. C. (2006). Behavioral thermoregulation and slowed migration by adult fall Chinook salmon in response to high Columbia River water temperatures. *Transactions of the American Fisheries Society*, 135(2), 408-419.
- Grossman, G. D. (1982). Dynamics and organization of a rocky intertidal fish assemblage: the persistence and resilience of taxocene structure. *American Naturalist*, 119 (5), 611- 637
- Grossman, G. D., Moyle, P. B. and Whitaker, J. O. (1982). Stochasticity in structural and functional characteristics of an Indiana stream fish assemblage: a test of community theory. *American Midland Naturalist*, 120, 423-454.
- Grossman, G. D., Ratajczak, Jr, R. E., Crawford, M. and Freeman, M. C. (1998). Assemblage organization in stream fishes: effects of environmental variation and interspecific interactions. *Ecological Monographs*, 68(3), 395-420.
- Hall, L. S., Krausman, P. R. and Morrison, M. L. (1997). The habitat concept and a plea for standard terminology. *Wildlife Society Bulletin*, 25(1), 173-182.
- Hallock, R. J., Elwell, R. and Fay, D. H. (1970). Migration of adult king salmon, *Oncorhynchus tshawytscha*, in the San Joaquin Delta as demonstrated by the use of sonic tags. *California Department Fish and Game Bulletin*, 151, California, E.U.A., 92 p.
- Hunter, C. R. (1990). *Better trout habitat: A guide o stream restoration and management*. Island Press. Washington. D. C., E.U.A. 320 p.
- Hunter, J. W. (1973). A discussion of game fish in the State of Washington as related to water requirements. Washington Department of Natural Resources, *Technical bulletin 115*. E. U. A.
- Jonsson, B., L' Abée-Lund, J. H., Heggbert, T. J., Jensen, A. J., Johnsen, B. O., Naesje, T. F. and Saettem, M. (1991). Longevity, body size, and growth in anadromous brown trout (*Salmo trutta*). *Canadian Journal of Fosheires Aquatic Sciences*, 48, 1838-1945.
- Knapp, R. A. and Dudley, T. L. (1990). Groth and longevity of golden trout, *Oncorhynchis aguabonita*, in their native streams. *California Fish and Game*, 76, 161-173.
- Kraska-Miller, M. (2013). *Nonparametric statistics for social and behavioral sciences*. CRC Press. Alabama, E.U.A., 260 p.
- Lane, E. W. (1957). *A study of the shape of channels formed by natural streams flowing in erodible material*. Missouri River Division Sediment Series° 9, U.S. Army Engineer Division, Missouri River. E. U. A. 121 p.

- Le Cren, E. D. (1972). Fish production in freshwaters. *Symposia of the Zoological Society London*, 115–133.
- Leopold, L. B. and Wolman, M. G. (1957) River channel patterns: braided, meandering and straight. Physiographic and hydraulic studies of rivers. Geological survey professional paper 282-B. Government United States. 85 p.
- Lobón-Cerviá, J. (2003). Spatiotemporal dynamics of brown trout production in a Cantabrian Stream: Effects of Density and Habitat Quality. *Transactions of the American Fisheries Society*, 132(4), 621-637.
- MacCrimmon, H. R. (1971). World distribution of rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* (28), 663-704.
- Major, R. L. and Mighell, J. L. (1967). Influence of Rocky Reach Dam and the temperature of the Okanogan River on the upstream migration of sockeye salmon. *Fishery Bulletin* 66, 131-147.
- Marcus, M. D., Noel, L. E. and Young, M. K. (1990). Rating salmonid habitat research needs in the Central Rocky Mountains. *Fisheries*, 15(5), 14-18
- Matthews, K. R., and Berg, N. H. (1997). Rainbow trout responses to water temperature and dissolved oxygen stress in two southern California stream pools. *Journal of Fish Biology*, 50(1), 50-67.
- Macnaughton, C. J., Harvey-Lavoie, S., Senay, C., Lanthier, G., Bourque, G., Legendre P. and Bosclair, D. (2015). Comparison of electrofishing and visual surveying methods for estimating fish community structure in temperate rivers. *River Research and Applications*, 31(8), 1040–1051.
- Mayden, R. L., Dillman, C. B., Espinosa-Pérez, H., Tomelleri, J. R., Kuhajda, B. R., Hendrickson, D. A., Ruiz-Campos, G., De los Santos-Camarillo, A. B., García De León, F., Varela-Romero, A., Propst, D. L., Brooks, J. E., Findley, L. T., George, A. L., Neely, D. A., Barriga-Sosa I. A. and Mayden. K.E. (2010). Evolution and diversity of trout species in Mexico. Proceedings of the Wild Trout X Symposium, Bozeman, Montana. E. U. A. 2010. (R.F. Carline y C. Lo Sapio, Ed.) 134-144
- Meehan, W. R. (1991). Influences of forest and rangeland management on salmonid fishes and their habitats: introduction and overview. U.S. Department of Agriculture Forest Service, *American Fisheries Society Special Publication 19*. Bethesda, Maryland. E. U. A. 751 p.
- Melton, F. A. (1936). An empirical classification of flood-plain streams. *Geographical Review*. 26 (4) 593-609.
- Mercado-Silva, N. y Bonar, S. A. (2013). Estandarización de métodos para el muestreo de peces de agua dulce en México: Avances y oportunidades. *Ciencia Pesquera*, 21(2), 57-63.
- Merritt, R. W., Cummins, K. W and Berg, M. B. (2008). *An introduction to the aquatic insects of North America*. Kendall Hunt. (4rd. ed). E.U.A., 862 p.

- Menge, B. A. and Sutherland, J.P. (1987). Community regulation: variation in disturbance, competition, and predation in relation to environmental stress and recruitment. *American Naturalist*, 130, 730-757
- Milner, N. J., Elliott, J. M., Armstrong, J. D., Gardiner, R., Welton, J. S. and Ladle, M. (2003). The natural control of salmon and trout populations in streams. *Fisheries Research*, 62(2), 111-125.
- Monan, G. E., Johnson, J. H. and Esterberg, G. F. (1975). Electronic tags and related tracking techniques aid in study of migrating salmon and steelhead trout in the Columbia River basin. *Marine Fisheries Review*, 37(2), 9-15.
- Morán-Zenteno, D. J. (1984). *Geología de la República Mexicana*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México, D.F. 87 p.
- Moyle, P. B., and Baltz, D. M. (1985). Microhabitat use by an assemblage of California stream fishes: developing criteria for instream flow determinations. *Transactions of the American Fisheries Society*, 114(5), 695-704.
- Needham, P. R. (1938). Notes on the introduction of *Salmo nelsoni* Evermann into California from Mexico. *Transactions of the American Fisheries Society*, 67(1), 139-146.
- Needham, P. R. (1955). Trail of the mexican trout. *Pacific Discovery*, 8(4), 18-24.
- Nelson, E. W. (1921). *Lower California and its natural resources*. US Government printing office, Memoirs of the National Academy of Sciences, 16 (1), 194 p.
- Northcote, T. G. and Hartman, G. F. (2008). *Fishes and forestry: worldwide watershed interactions and management*. John Wiley & Sons. Iowa. E.U.A. 794 p.
- O' Connor, J. E. and Chase, C. G. (1989). Uplift of the Sierra San Pedro Mártir Baja California. *Tectonics*, 8, 833-844.
- Peinado, M., Bartolomé, C., Delgadillo, J. y Aguado, I. (1994). Pisos de vegetación de la Sierra de San Pedro Mártir, Baja California, México. *Acta Botánica Mexicana*, 29, 1-30.
- Penaluna, B. E., Abadía-Cardoso, A., Dunham, J. B., García-De León, F. J., Gresswell, R. E., Ruiz-Luna, A., Taylor, E. B., Shepatd, B. B., Al-Chokhachy R., Muhfeld, C. C., Bestgen, K. R., Rogers, K., Escalante, M. A., Keeley, E. R., Temple, G. M., Williams, J. E., Matthews, K. R., Pierce, R., Mayden, R. L., Kpvach, R. P., Garza, J. C. and Fausch, K. D. (2016). Conservation of native Pacific trout diversity in Western North America. *Fisheries (Bethesda)*, 41(6), 286-300.
- Pennak, R. W. (1953). *Fresh-water invertebrates of the United States*. In Fresh-water invertebrates of the United States. Ronald Press. E. U. A. 826 p.

- Platts, W. S., Megahan, W. F. and Minshall, G. W. (1983). *Methods for evaluating stream, riparian, and biotic conditions*. United States Department of agriculture, Forest Service. 70 p.
- Poff, N. L. and Ward. J. V. (1989). Implications of stream variability and predictability for lotic community structure: a regional analysis of streamflow patterns. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 46, 1805-1818.
- Quinn, T. P. and Fresh, K. (1984). Homing and straying in chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) from Cowlitz River Hatchery, Washington. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 41(7), 1078-1082.
- Quinn, T. P. and Peterson, N. P. (1996). The influence of habitat complexity and fish size on over-winter survival and growth of individually marked juvenile coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) in Big Beef Creek, Washington. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 53(7), 1555-1564.
- Reingold, M. (1968). Water temperature affects the ripening of adult fall Chinook salmon and steelhead. *The Progressive Fish-Culturist*, 30(1), 41-42.
- Reynolds, J. B. and Kolz, L. (2012). Electrofishing. En: A.V. Zale, D.L. Parrish y T.M. Sutton, (eds.) *Fisheries techniques*. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland. E.U. A. (3rd. ed). 305-361.
- Rhymer, J. M. and Simberloff, D. (1996) Extinction by hybridization and introgression. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 27, 83–109.
- Rosgen, D. L. (1994). A classification of natural rivers. *Catena*, 22(3), 169-199.
- Rubidge, E. M. and Taylor, E. B. (2005). An analysis of spatial and environmental factors influencing hybridization between native westslope cutthroat trout (*Oncorhynchus clarki lewisi*) and introduced rainbow trout (*O. mykiss*) in the upper Kootenay River drainage, British Columbia. *Conservation Genetics*, 6(3), 369-384.
- Ruiz-Campos, G. Caracterización limnológica de los arroyos de la Sierra de San Pedro Mártir, como habitats de la trucha endémica *Oncorhynchus mykiss nelsoni* (Evermann). En Memoria III Semana de la Exploracion y la Historia: Sierra San Pedro Mártir. Ensenada, México. 1991. (C. Lazcano ed.). 39-51. Impreso.
- Ruiz-Campos, G. (1993). Bionomia y ecología poblacional de la trucha de la Sierra San Pedro Mártir, *Oncorhynchus mykiss nelsoni*. Tesis de Doctorado en Ciencias. Universidad Autónoma de Nuevo León, México. 223 p.
- Ruiz-Campos, G. (2008). Caracterización de hábitat de la trucha apareque del arroyo Ureyña, Ejido Panalachi, Chihuahua. Reporte de trabajo de campo: 19-21 de marzo de 2008, 19–21.

- Ruiz-Campos, G. (2013). Caracterización de hábitats acuáticos de la Sierra de San Pedro Mártir. 17^{va}. Convocatoria Interna de apoyo a investigación de la Universidad Autónoma de Baja California, México.400/1/C/26/17
- Ruiz-Campos, G. (2016). *La trucha arcoiris de la Sierra San Pedro Mártir: bionomía, ecología poblacional, hábitat y conservación*. Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, Baja California, México (en prensa).
- Ruiz-Campos, G. and Gómez-Ramírez, J. (1991). Age and growth of San Pedro Mártir rainbow trout, *Onchorhynchus mykiss nelsoni* (Evermann), from Arroyo San Rafael, Baja California, México. *Proceedings of the Desert Fishes Council*, 21, 141- 161.
- Ruiz-Campos, G. and Villalobos-Ramírez, M. M. (1991). A simple technique for making a streamer-type fish tag. *North American Journal of Fisheries and Management*, 11(3), 475-476.
- Ruiz-Campos, G., y Cota-Serrano, P. (1992). Ecología alimenticia de la trucha arcoiris (*Onchorhynchus mykiss nelsoni*) del arroyo San Rafael, Sierra San Pedro Mártir, Baja California, México. *Southwestern Naturalist*, 37(2), 166-177.
- Ruiz-Campos, G. y Pister, E. P. (1995). Distribution, habitat, and current status of the San Pedro Martir rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss nelsoni* (Evermann). *Bulletin of the Southern California Academy of Science*, 94(2), 131–148.
- Ruiz-Campos, G., Pister, E. P. and Copean-Jimenez, G. A. (1997). Age and growth of Nelson’s Trout, *Oncorhynchus mykiss nelsoni*, from Arroyo San Rafael, Sierra San Pedro Martir, Baja California, Mexico. *Southwestern Association of Naturalist*, 42(1), 74–85.
- Ruiz-Campos, G., Camarena-Rosales, F., González-Acosta, A. F., Maeda-Martínez, A. M., De León, F. J. G., Varela-Romero, A. y Andreu-Soler, A. (2014). Estatus actual de conservación de seis especies de peces dulceacuícolas de la península de Baja California, México. *Revista Mexicana de biodiversidad*, 85(4), 1235-1248.
- Ruiz-Campos, G., Camarena-Rosales, F., Varela-Romero, A., Sánchez-González, S. and De La Rosa-Vélez, J. (2003). Morphometric variation of wild trout populations from Northwestern México (Pisces: Salmonidae). *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 13, 91-110.
- Semarnat (2010). *NORMA oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo*. Diario Oficial, 78. México.
- Schumm, S. A. (1963). A tentative classification of alluvial river channels. U.S. Geological Survey Circular 447. Washington, E.U.A.

- Schumm, S. A. (1977). *The Fluvial System*. Wiley, Nueva York, E.U.A, 338 p.
- Silver, L. T. and Chappell, B. W. (1988). The peninsular ranges batholiths: An insight into the evolution of the Cordilleran batholiths of southwestern North America. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 79, 105-121.
- Smith, R. H. (1991) Rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss nelsoni*. 304-332 p. En Trout. J. Stolz y J. Schnell (eds.). The Wildlife Series, Stackpole Books, Harrisburg, Pennsylvania. E.U.A.
- Snyder, J. O. (1926). The trout of the Sierra San Pedro Martir, Lower California. *University of California Publications in Zoology*, 21, 419-426.
- USDA-USFS (1990). *Pacific southwest region habitat typing field guide*. Oregon, E.U.A. Impreso.
- Tamayo, J. L. (1962). *Geografía general de México: geografía física*. Tomo II. Instituto de Investigaciones Económicas. México. 648 p.
- Taylor, E. B. (2004). An analysis of homogenization and differentiation of Canadian freshwater fish faunas with an emphasis on British Columbia. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 61, 68–79.
- Thornbury, W. D. (1969). *Principles of Geomorphology*. 2da Edición. Wiley, Nueva York. E.U.A. 618 p.
- Utt, C. E. *Como las truchas subieron a la Sierra de San Pedro Mártir*. Carta enviada a Dr. Carl L. Hubbs, junio 15 de 1945. Traducida y presentada por Mike Wilken Robertson. Pp- 36-38 En Memoria III Semana de la exploración y la historia: Sierra de San Pedro Mártir. 1991. (C. Lazcano ed.). Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada., México.
- Vincent, R. (1971). River electrofishing and fish population estimates. *Progressive Fish Culturist* 33 (3), 163-169.
- Wynne-Edward, V. C. (1962). *Animal dispersion in relation to social behavior*. Oliver and Boyd. Edimburgo, Escocia. 653 p.
- Zar, J.H. (1999). *Biostatistical Analysis*. (4th. ed.) Prentice-Hall Inc, Upper Saddle River, New Jersey, E.U. A. 960 p.

Anexos

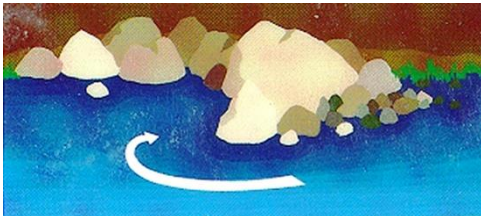
Anexo 1

Fotografías de las unidades de hábitat identificadas en los arroyos de la Sierra de San Pedro Mártir, durante los muestreos para la caracterización del hábitat de la trucha *Oncorhynchus mykiss nelsoni*, durante el periodo de febrero de 2014 a agosto de 2015.

MACROHÁBITAT DE POZA

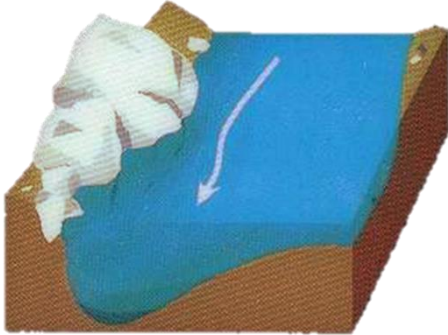
Poza de flujo inverso, PFI

(backwater pool, BWP).



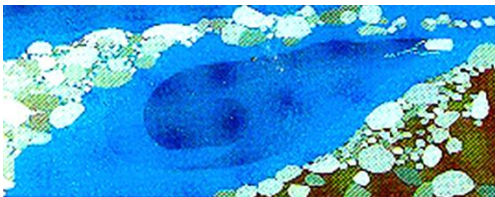
Poza de erosión lateral, PEL

(lateral scour pool, LSP)



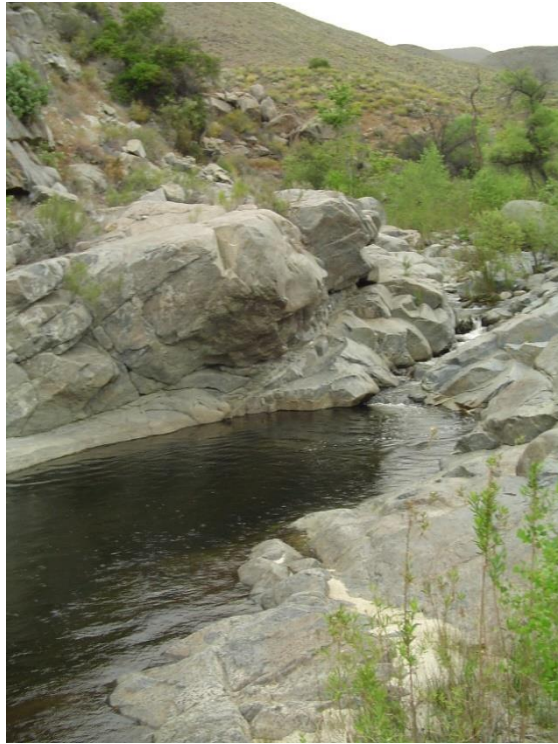
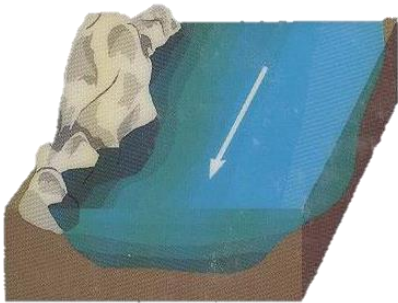
Poza por represamiento natural, PRN

(dammed pool, DPL)



Poza de erosión central, PEC

(mid-channel pool, MCP)



Poza de caída, PCA.

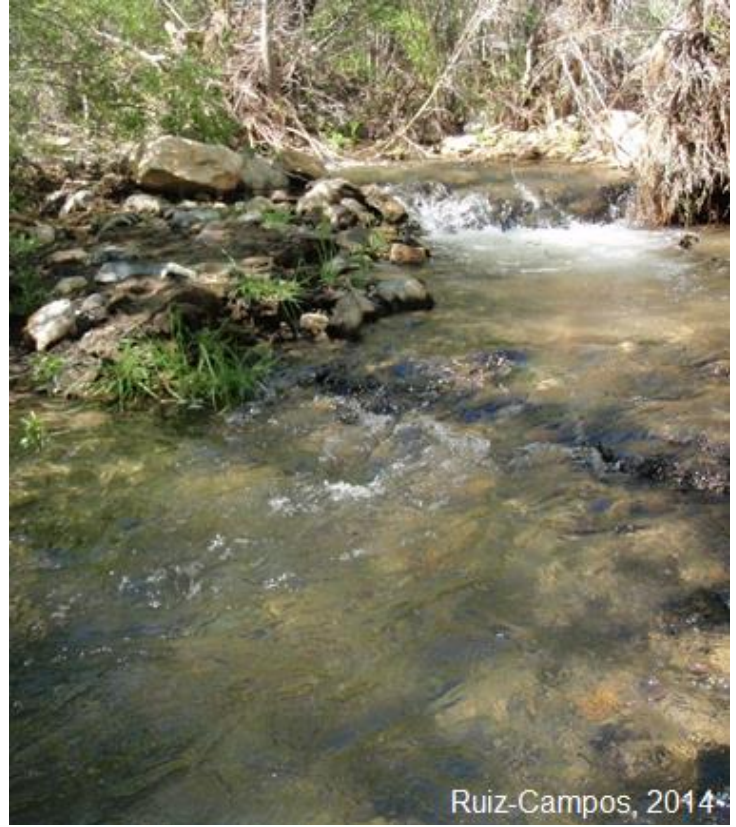
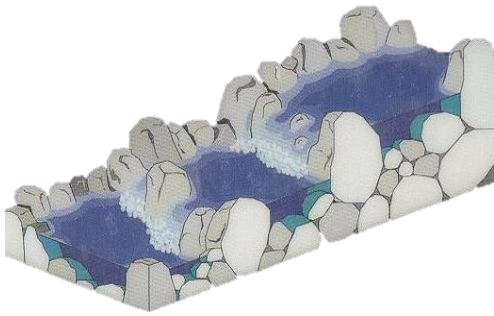
(lateral scour pool, PLP).



Pozas en escalón, PES



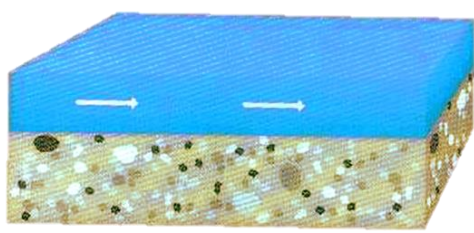
(step run, STP)



MACROHÁBITAT DE CORRIENTE

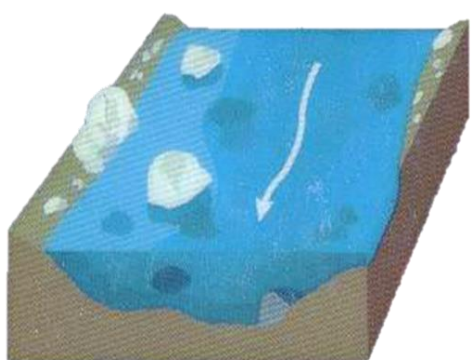
Corriente de flujo laminar, CFL

(glide, GLD)



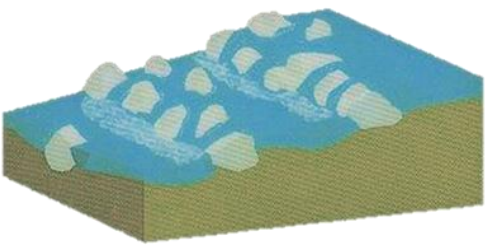
Corriente, COR

(run, RUN)



Corriente en escalón, COE

(step run , SRN)

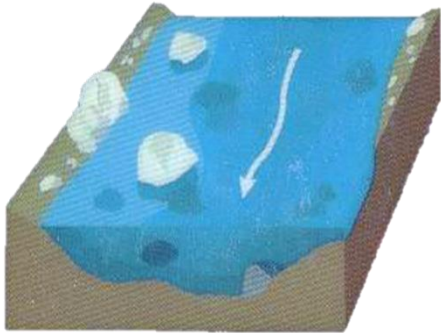


Ruiz-Campos, 2014

MACROHÁBITAT DE RÁPIDO

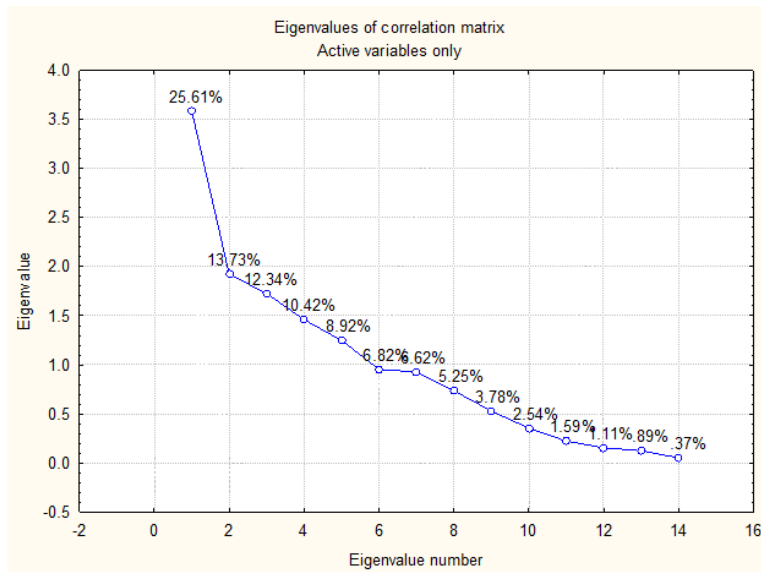
Rápido de bajo gradiente, RBG

(low gradient riffle, LGR)



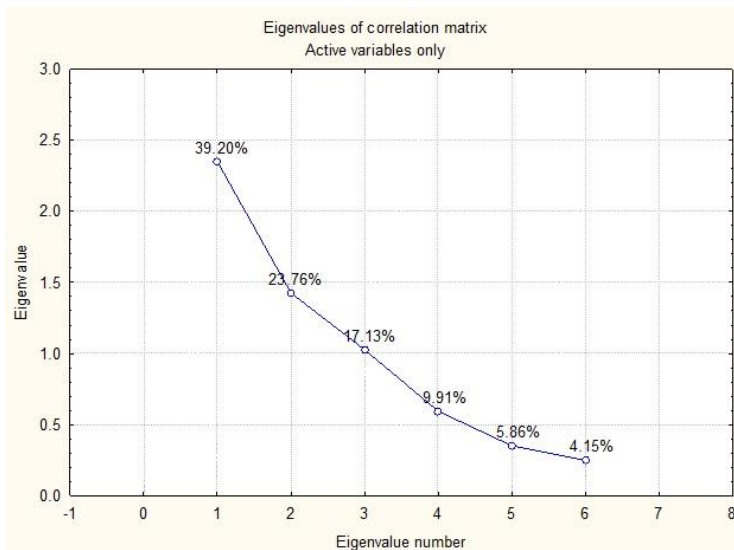
Anexo 3

Variación explicada de los diferentes ejes en el análisis de variables estructurales del hábitat de la trucha de San Pedro Mártir, considerando como variables suplementarias la talla y la abundancia (densidad) de truchas.



	Eigenvalue	% Total	Acumulado	Acumulado
1	3.585019	25.60728	3.58502	25.6073
2	1.922291	13.73065	5.50731	39.3379
3	1.727363	12.33831	7.23467	51.6762
4	1.459340	10.42386	8.69401	62.1001
5	1.248867	8.92048	9.94288	71.0206
6	0.954540	6.81814	10.89742	77.8387
7	0.926679	6.61914	11.82410	84.4579
8	0.735377	5.25269	12.55948	89.7105
9	0.528786	3.77705	13.08826	93.4876
10	0.355062	2.53615	13.44332	96.0237
11	0.223172	1.59409	13.66650	97.6178
12	0.155932	1.11380	13.82243	98.7316
13	0.125103	0.89359	13.94753	99.6252
14	0.052468	0.37477	14.00000	100.0000

Variación explicada de los diferentes ejes en el análisis de variables fisicoquímicas del hábitat de la trucha de San Pedro Mártir, considerando como variables suplementarias la talla y la abundancia (densidad) de truchas



	Valor propio	% Total	Acumulado	Acumulado
1	2.351962	39.19936	2.351962	39.1994
2	1.425664	23.76107	3.777626	62.9604
3	1.027607	17.12678	4.805233	80.0872
4	0.594593	9.90989	5.399826	89.9971
5	0.351419	5.85698	5.751245	95.8541
6	0.248755	4.14592	6.000000	100.0000