



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE  
BAJA CALIFORNIA**

**FACULTAD DE CIENCIAS**



**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE ECOSISTEMAS  
DE ZONAS ÁRIDAS**



**“PROPUESTA DE MANEJO PARA EL PEZ CACHORRITO DEL DESIERTO  
(*CYPRINODON MACULARIUS* BAIRD & GIRARD) EN LA LAGUNA DE LA PLANTA  
GEOTÉRMICA DE CERRO PRIETO, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO”**

**TESIS**

Que para obtener el grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS**

Presenta

**MIGUEL ANTONIO FLORES GALVÁN**

**ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, ABRIL DE 2013**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**MAESTRÍA EN MANEJO DE ECOSISTEMAS DE ZONAS ÁRIDAS**

“PROPUESTA DE MANEJO PARA EL PEZ CACHORRITO DEL DESIERTO  
(*CYPRINODON MACULARIUS* BAIRD & GIRARD) EN LA LAGUNA DE LA PLANTA  
GEOTÉRMICA DE CERRO PRIETO, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO”

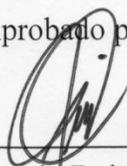
TESIS

Que para obtener el grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta

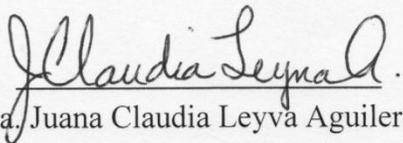
MIGUEL ANTONIO FLORS GALVÁN

Aprobado por



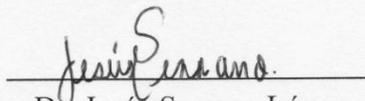
Dr. Gorgonio Ruiz Campos

Director de tesis



Dra. Juana Claudia Leyva Aguilera

Sinodal



Dr. Jesús Serrano López

Sinodal

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, ABRIL DE 2013

## **Resumen**

Se generó una propuesta de manejo para el pez cachorrito del desierto (*Cyprinodon macularius*) en la laguna de evaporación de la planta Geotérmica Cerro Prieto, Baja California, México. Esta propuesta de manejo está basada en el método conocido como PER, en la cual se identifican las Presiones y el Estado del sistema, proponiendo Respuestas para mantener o mejorar la calidad del mismo. Para determinar el estado actual del sistema se utilizó el resultado de la suma de los indicadores de ecología del paisaje (CAP y PN) y la abundancia absoluta de los diferentes tipos de hábitats, donde hubo una dominancia del segundo cuartil. Para la presión se realizó un análisis de amenazas y se utilizaron las métricas PROX y ENN para medir la fragmentación y el grado de conexión, donde el principal impacto resultó ser la disminución del espejo de agua seguido por la salinidad dentro de un sistema altamente fragmentado pero con un grado de conexión alto. Las propuestas de manejo se derivaron de la suma de los indicadores de presión y estado, obteniendo una dominancia del segundo cuartil o una calidad media y se identificaron los sitios que deben de conservar su calidad y aquéllos que deben de mejorarla, por lo que las propuestas se enfocan a resolver o minimizar los impactos a nivel unidad; a nivel sistema se realizó un análisis FODA para completar la conservación de la especie y el ambiente.

**Palabras clave:** Manejo, *Cyprinodon macularius*, Cerro Prieto, geotérmica, metapoblación, amenazas.

## **Dedicatoria**

### **A mi esposa e hija:**

Idalia Yazmin Castañeda Yslas

Yazmin Esmeralda Flores Castañeda

### **A mis padres:**

Alma Rosa Galván Jurado

Antonio Flores Ibarra

### **A mis hermanos:**

Marcus Eduardo Flores Galván

Aldo Yunuen Flores Galván

## **Agradecimientos**

A mi director de tesis, Dr. Gorgonio Ruiz Campos, quien supervisó académica y logísticamente las diferentes etapas de mi trabajo de tesis, además de su apoyo en los muestreos de campo.

A la Dra. Claudia Leyva y el Dr. Jesús Serrano por formar parte del sínodo y ayudarme a complementar este trabajo con sus valiosas aportaciones académicas y terminar la tesis.

Al M. en C. Salvador González Guzmán, M. en C. Sergio Sánchez Gonzáles, M. en C. Fernando Solís Carlos y David Ceseña Gallegos, por todo su valioso apoyo en los eventos de muestreo en el área de estudio.

A los profesores que me dieron clases y me brindaron sus conocimientos: Dra. Ileana Espejel, M.C. Ricardo Eaton, Dra. Evarista Arellano, Dra. Lilia Alemán, Dra. Claudia Leyva, Dra. Nora Martijena, Dr. Martín Escoto, Dr. Roberto Martínez, Dr. Jesús Serrano y Dr. Gorgonio Ruiz Campos.

A todos mis compañeros de la maestría en Manejo de Ecosistemas de Zonas Áridas, Generación 2010- 2012 (Cristiane Aguilar, Aarón Arizpe, Rosa Carmona, Hugo Espinoza, Pablo Franco, Itzel Frías, Sergio Martínez, Marina Mondragón, Natalia Rodríguez, Fernando Solís, Soledad Valdés y César Vázquez), pues con ellos aprendí a trabajar en un equipo multidisciplinario. También a Carlos Castañeda y a mi padre Antonio Flores por su apoyo económico durante el inicio de la maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca que me brindó durante mis estudios de posgrado en el programa de maestría en Manejo de Ecosistemas de Zonas Áridas. Asimismo, agradezco a la Universidad Autónoma de Baja California por otorgarme una beca derivada del proyecto interno No. 213 “Evaluación Ecológica y Distribución de Especies Exóticas Invasivas Selectas en Humedales del Estado de Baja California”, a través de Cuerpo Académico Estudios Relativos a la Universidad. La parte final de este estudio recibió apoyo del proyecto Comisión Federal de Electricidad AA-018TOQ034- N47-2012 “Manejo Poblacional y de Hábitat del Pez

Cachorrito del Desierto (*Cyprinodon macularius*) en las Lagunas de la Planta Geotérmica de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, México.”

A la Comisión Nacional de Electricidad (CFE) y personal adscrito al Campo Geotérmico de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, especialmente a la Ing. Lourdes Hernández Garza (jefa del Departamento de Química y Ambiental), Ing. Sergio Miguel Miranda Vega (Residente General, CFE, Mexicali), Ing. Álvaro M. Aguilar Dumas (Residente de Estudios del Campo Geotérmico de Cerro Prieto), Ing. Enrique Sandoval Cota (jefe del Departamento de Manejo de Aguas), Quím. David Gómez Ruíz (Departamento de Química y Ambiental), Quím. Jesús Antonio Sánchez Elizalde (Departamento de Química y Ambiental), Sr. Víctor González R., Lic. Oscar Hernández (CFE, Mexicali), y Lic. Alonso Vicente Ríos Sánchez (Oficina de Servicios Generales) por el apoyo logístico y las facilidades otorgadas durante todo el periodo de estudio.

Finalmente, a mí querida esposa Idalia Castañeda, por apoyarme y darme tiempo para terminar la tesis.

# Índice

Hoja de firmas.....	I
Resumen .....	II
Dedicatoria.....	III
Agradecimientos .....	IV
Índice.....	VII
Índice de Figuras .....	VIII
Índice de Tablas .....	IX
Introducción.....	1
Antecedentes.....	3
<i>Cyprinodon macularius</i> .....	3
Descripción.....	3
Distribución .....	4
Reproducción .....	5
Relación peso-longitud y factor de condición somático.....	5
Estatus de protección .....	6
Impacto ambiental.....	7
Marco conceptual .....	9
Fundamentos de Ecología del paisaje.....	9
Fragmentación .....	10
Conectividad .....	11
El concepto de Metapoblación .....	11
Métricas del paisaje .....	13
Objetivos .....	16
Objetivo general.....	16
Objetivos específicos .....	16
Área de estudio.....	17
Metodología.....	20
Estado .....	20
Ecología poblacional .....	20

Evaluación del patrón del paisaje .....	22
Indicadores del Estado .....	23
Presión .....	24
Indicadores de Presión.....	26
Respuesta.....	26
Resultados.....	27
Parámetros fisicoquímicos.....	27
Abundancia relativa, proporción de sexo y estructura poblacional .....	29
Tipos de hábitat .....	34
Distribución espacial .....	37
Patrón del paisaje .....	39
Análisis de amenazas .....	42
Propuestas de Manejo .....	44
Discusión .....	50
Conclusiones .....	56
Literatura citada.....	58

## Índice de Figuras

Figura 1. Pez cachorrito del desierto, <i>Cyprinodon macularius</i> : macho (arriba), y hembra (abajo).....	3
Figura 2. Distribución actual del pez cachorrito del desierto, <i>Cyprinodon macularius</i> , en el Bajo Río Colorado, de México y Estados Unidos de América .....	4
Figura 3. Elementos del paisaje basados en Forman y Gordon (1981).....	9
Figura 4. Estructuras metapoblacionales: a) Clásica de Levins, b) Isla – Continente y Fuente – Sumidero, c) Patchy y d) Desequilibrio. Las flechas representan el desplazamiento poblacional, los círculos claros representan parches disponibles y los círculos oscuros las poblaciones locales. ....	13
Figura 5. Área de estudio: laguna de evaporación de la geotérmica de Cerro Prieto, demostrando el sistema de vasos para el manejo del agua residual y su final reinyección.....	18
Figura 6. Trampa tipo “minnow”, con sus respectivas dimensiones .....	21
Figura 7. Dimorfismo sexual en la coloración en <i>Cyprinodon macularius</i> : (a) macho, y (b) hembra.....	21
Figura 8. Graficas de la estructura poblacional por sexo y total de <i>Cyprinodon macularius</i> en la laguna de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, México, con la longitud total mínima, máxima y media de Marzo 2011.. .....	32
Figura 9. Graficas de la estructura poblacional por sexo y total de <i>Cyprinodon macularius</i> en la laguna de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, México, con la longitud total mínima, máxima y media de Septiembre 2011.....	33
Figura 10. Comparación de la estructura poblacional de <i>Cyprinodon macularius</i> en distintos años en la laguna de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, México.....	34
Figura 11. Sitios muestreados con diferentes tipos de hábitat en la laguna de evaporación de la geotérmica de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, durante el periodo 2011-2012 .....	35
Figura 12. Tipos de hábitats identificados en la laguna de la geotérmica de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California: a) Canal, b)Ruppia-Inundado, c)Ruppia-Canal, d)Inundado, e)Inundado-Allenrolfea, y f) Allenrolfea-Canal.....	36
Figura 13. Poblaciones del pez cachorrito del desierto ( <i>Cyprinodon macularius</i> ) en la laguna de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California: a) Marzo 2011, b) Septiembre 2011, y c) Distribución metapoblacional.. .....	38
Figura 14. Caracterización del paisaje actual en la laguna de evaporación de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, durante el período 2011.....	40
Figura 15. Distribución potencial del pez cachorrito del desierto en la laguna de evaporación de Cerro Prieto, en 2011-2012. ....	41
Figura 16. Clasificación del Índice EstPre para la laguna de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California. ....	46

## Índice de Tablas

Tabla I. Valores fisicoquímicos del agua, registrados para cada punto y zona de colocación de trampas en la laguna de evaporación de Cerro Prieto, durante los muestreos de 2011-2012.....	28
Tabla II. Número de individuos de <i>Cyprinodon macularius</i> por sexo y total recolectados por evento de muestreo en la laguna de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, México.....	30
Tabla III. CPUE por sexo y combinados en las tres recolectas, y en total, en la laguna de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, México .....	40
Tabla IV. Proporción de sexos hembra:macho (H:M) en las diferentes recolectas y en total en la laguna de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, México. ....	30
Tabla V. Abundancia de individuos de <i>Cyprinodon macularius</i> por tipo de hábitat en la laguna de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, México .....	36
Tabla VI. Número de parches de cada cobertura y la proporción de área por clase en la laguna de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California. ....	41
Tabla VII. Coberturas y resultado de las métricas PROX y ENN, en la laguna de evaporación de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, durante el periodo 2011-2012.....	42
Tabla VIII. Asignación de valores para los diferentes sistemas de conservación en la laguna de evaporación de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, durante el periodo 2011-2012.....	42
Tabla IX. Puntuaciones de los Impactos y Fuentes en la laguna de evaporación de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, durante el periodo 2011-2012.....	43
Tabla X. Asignación de valores para los sistemas de conservación en la laguna de evaporación de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, durante el periodo 2011-2012.....	44
Tabla XI. Actores potenciales identificados para la realización de la propuesta de manejo del pez cachorrito del desierto ( <i>Cyprinodon macularius</i> ) en la laguna de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California.45	
Tabla XII. Unidades correspondientes a la clasificación de prioridad dada por el índice EstPre, durante el periodo 2011-2012 en la laguna de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California. ....	45
Tabla XIII. Análisis FODA para la laguna de evaporación de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California.....	47
Tabla XIV. Propuestas de manejo para los impactos en la laguna de evaporación de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, durante el periodo 2011-2012 .....	48
Tabla XV. Propuestas de manejo a nivel Sistema en la laguna de evaporación de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, durante el periodo 2011-2012.....	49

## **Introducción**

El pez cachorrito del desierto, *Cyprinodon macularius*, es una especie dulceacuícola de origen secundario que es endémica a la cuenca del Bajo Río Colorado de México y Estados Unidos de América (USFWS, 2010). Su distribución actual en México está confinada a cuatro localidades: una en Baja California (lagunas de evaporación de la Geotérmica de Cerro Prieto) y las otras tres en Sonora (Canal Welton-Mohawk, Ciénegas El Doctor y Ciénega de Santa Clara) (Varela-Romero et al., 1999). El estatus poblacional de esta especie es considerado en peligro de extinción debido a la pérdida y fragmentación de sus hábitats, contaminación e introducción de especies exóticas (Varela-Romero et al., 2002).

Un aspecto importante de esta especie es su amplia tolerancia a condiciones ambientales extremas, principalmente de temperatura y salinidad, condición que le ha permitido habitar tanto ambientes lacustres como palustres, incluyendo las lagunas de alta salinidad del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, en el Valle de Mexicali, Baja California (Varela-Romero et al., 2002). Sin embargo, todas sus poblaciones han sido consideradas en peligro de extinción, por la pérdida y modificación de sus hábitats, contaminación e introducción de peces exóticos (CADFG, 1980; AGFD, 1988; IUCN, 1990; DOF, 1994, Hendrikson y Varela-Romero, 1989, Varela-Romero et al., 2002). La primera inclusión de esta especie en la categoría de en peligro de extinción fue a través de los gobiernos estatales de California (CADFG, 1980) y Arizona (AGFD, 1988). Posteriormente fue agregada a la lista roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, 1990), y hasta el año de 1994 fue incluida por el Gobierno Mexicano (DOF, 1994) en la Norma Oficial Mexicana 059 como una especie en peligro de extinción.

El complejo geotérmico de Cerro Prieto de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) construyó una serie de vasos lacustres de evaporación, sobre un humedal preexistente y de menor tamaño, conocido como lago Volcano (Nelson, 1921), donde de manera natural se distribuía el pez cachorrito del desierto (Follett, 1960). Desde 1973 estos vasos lacustres se utilizan para recibir las descargas del agua de la planta geotérmica, pero sin ningún esquema de manejo para la conservación y protección de la especie estudiada.

En virtud de lo antes descrito, el presente estudio, aporta una propuesta de manejo para el pez cachorrito del desierto (*Cyprinodon macularius*) en la laguna de evaporación de la planta Geotérmica de Cerro Prieto, Baja California, México, con base en el análisis integrativo de atributos tipo poblacional, hábitat, paisajísticos y de amenazas.

## Antecedentes

### *Cyprinodon macularius*

#### Descripción

El pez cachorrillo del desierto (*Cyprinodon macularius*) fue descrito por Baird y Girard en 1853, como un pez pequeño menor de 70 mm de longitud, de cuerpo robusto y lateralmente comprimido y con una hilera de dientes en la mandíbula; machos más grandes que las hembras; coloración corporal plateada y lados con una barra de líneas oscuras verticales; en época reproductiva, la coloración del cuerpo en los machos se torna azul turquesa metálico; los machos se distinguen de las hembras por la presencia de una mancha oscura en la punta de la aleta anal como se aprecia en la figura 1 (USFWS, 1993, 2008; Sutton, 1999; Varela-Romero et al., 2002). En estado larval comienzan alimentándose de pequeños invertebrados, cuando crecen se convierte en un pez omnívoro oportunista, consumiendo cualquier variedad de algas, plantas, invertebrados y el detritus que esté disponible; los adultos tienen una dieta que incluye a ostrácodos, copépodos, otros crustáceos, insectos, moluscos, gusanos y pedazos de macrófitas, pero las algas y el detritus son predominantes en sus dietas (USFWS, 1993).



Figura 1. Pez cachorrillo del desierto, *Cyprinodon macularius*: macho (arriba) y hembra (abajo). Fotografía Miguel Flores.

## Distribución

El pez cachorrito fue reportado por primera vez en las ciénagas salinas de Imperial, California (E.U.A.) y posteriormente en el Rio Colorado y otros sitios de California como Salton Sea, Figtree John Spring, Fish Spring, Dos Palmas Spring, San Felipe Creek, Mecca, Thermal e Indio (Black, 1980). En la parte mexicana se ha reportado en los ríos Colorado y Hardy, ciénagas El Doctor, Santa Clara, Laguna Salada y la laguna de evaporación de Cerro Prieto. Actualmente, su distribución en California se restringe a Salton Sea y escurrimientos que incluyen a San Felipe Creek, mientras que en México se confina a las ciénagas Santa Clara, El Doctor, Flor del Desierto y la laguna de evaporación de Cerro Prieto (Fig. 2) (Varela-Romero et al. 1999 y 2002).

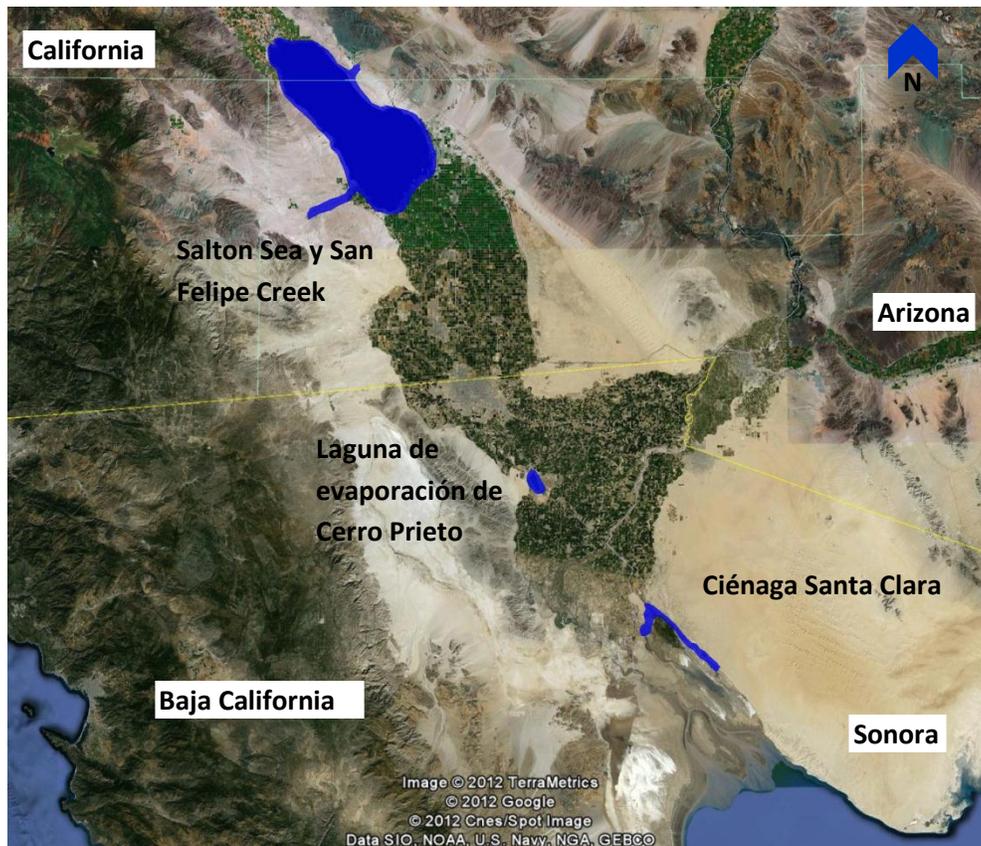


Figura 2. Distribución actual del pez cachorrito del desierto, *Cyprinodon macularius*, en el Bajo Río Colorado, de México y Estados Unidos de América. Elaboración propia.

## **Reproducción**

El pez cachorrito del desierto madura rápidamente, alcanzando su madurez sexual aproximadamente a los 15 mm de longitud total; la mayoría no se reproduce hasta que alcanzan una longitud total de 60 mm. El desove ocurre entre marzo y finales de septiembre, cuando la temperatura excede los 20°C. Durante el periodo de apareamiento, los machos se vuelven territoriales, los cuales normalmente pueden defender un territorio de uno a dos metros cuadrados, dependiendo de la densidad, llegando ser tan pequeño como 60 centímetros cuadrados; para la deposición de huevos el pez prefiere profundidades de 18 a 22 centímetros y los territorios son el centro de objetos hundidos o hendiduras en el fondo. En el comportamiento cuando la hembra está lista para desovar es atraída hacia el territorio de los machos separándose de su grupo, ella se acerca al macho quien realiza movimientos y queda paralela a ella, entonces los dos se unen formando una "S" y el macho une su aleta anal en el vientre de la hembra, después la hembra deja expulsa un huevo que es fertilizado por el macho y este proceso puede durar menos de un minuto; dependiendo del tamaño de la hembra, la fecundidad varía entre 50 y 800 huevos por temporada. Los huevos eclosionan en 10 días a una temperatura de 20°C, las larvas después de un día de nacidos comienzan a alimentarse de pequeños invertebrados y frecuentemente se encuentran en hábitats someros litorales donde la cobertura sirve de protección (Sutton, 1999).

## **Relación peso-longitud y factor de condición somático**

La relación peso-longitud (P-L) de las cuatro poblaciones actuales del pez cachorrito del desierto en la parte Mexicana fueron estudiados por Ruiz-Campos et al. (2012) a través de muestreos bimensuales entre septiembre 1996 y agosto 1997. La pendiente (b) de la regresión P-L de cada una de las poblaciones fue utilizada para determinar diferencias en la condición somática de los individuos entre las cuatro poblaciones, La pendiente (b) varió de 3.238 (población Cerro Prieto) a 3.613 (población Welton-Mohawk), demostrando en todos los casos un crecimiento somático alométrico positivo. Los machos tuvieron valores de b mayores que aquellos de hembras para Cerro Prieto (3.303 vs 3.071), Welton-Mohawk (3.866 vs 3.579) y Flor del Desierto (3.357 vs 3.169). La profundidad y la salinidad fueron las variables ecológicas

que explicaron la mayor parte de la variación en la condición somática del pez cachorrito del desierto, con un efecto negativo y un positivo, respectivamente.

### **Estatus de protección**

El pez cachorrito del desierto se encuentra en hábitats de tipo ciénagas, manantiales, pequeños arroyos, orillas de grandes ríos, lugares someros de lagunas y agua salobre, pues cuenta con una tolerancia a grandes fluctuaciones de temperatura, concentraciones bajas de oxígeno y concentraciones altas de salinidad. A pesar de sus características no es efectivo contra la depredación y competencia de especies introducidas, ni la pérdida y modificación de hábitat, lo que lo ha puesto en protección por el Gobierno de Estados Unidos de América, en California en 1980 por el Departamento de Caza y Pesca de California (CDFG) y en Arizona desde 1988 por el Departamento de Pesca y Caza de Arizona (AGFD) (AGFD, 2012; USFWS, 2010); en 1990 la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza lo agrega a su lista como especie en peligro de extinción (IUCN, 1994); después México en 1994 lo incluye en la NOM-059 como especie endémica en peligro de extinción (DOF, 1994).

Como respuestas a la disminución de las poblaciones del pez cachorrito del desierto en 1993 se realizó en los Estados Unidos de América un plan de recuperación para la especie. Este plan incluye varios puntos en los cuales destaca: 1) protección a las poblaciones naturales, 2) restablecimiento de poblaciones, 3) establecimiento de refugios, 4) desarrollar protocolos para el intercambio genético, 5) monitoreo y mantenimiento a las poblaciones naturales y refugiadas, 6) determinación de los factores que afectan la presencia del pez, entre otros. Estas tareas también se plantearon para la parte mexicana y contaban con financiamiento. Actualmente las poblaciones naturales del cachorrito del desierto en Estados Unidos de América se encuentra igual que desde 1993, sin embargo para México las poblaciones siguen disminuyendo a pesar del programa de manejo que incluye la protección y conservación de las poblaciones naturales, además de que en la laguna de evaporación de Cerro Prieto de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), que es una instalación industrial, resguarda la población más importante de la especie en el noroeste del país (Varela-Romero et al, 2002; USFWS, 1993, 2009 y 2010).

## **Impacto Ambiental**

El ambiente incluye los sistemas naturales, transformados y construidos por acciones humanas, que incluyen los sistemas físicos (clima, aire, suelo y agua), biológicos (flora y fauna) y humanos (población, cultura, economía y valores). Los sistemas transformados no siempre son desfavorables para las especies, puesto que pueden generar condiciones propicias para ciertos organismos y pueden ser usados como refugios, lugares de descanso, lugares de alimentación, apareamiento y hasta de hábitat (Fajardo et al., 2006). Tal es el caso de la planta geotérmica de Cerro Prieto en el Valle de Mexicali, Baja California, México.

En 1973, la planta geotérmica Cerro Prieto de la Comisión Federal de Electricidad empezó sus operaciones comerciales en la extracción de vapor geotérmico que es distribuido a las diferentes centrales generadoras y cuenta con 172 pozos que se encuentran integrados a la generación de energía eléctrica. El agua residual generada por este proceso es vertida en una laguna que se transformó, formada por bordos de arena que sirvieron como cercos para evitar escorrentías, siendo esta agua limpiada mediante un proceso de decantación de sales y silicatos, y finalmente reinyectada al subsuelo (Camacho, 2009).

Previo a la construcción de las lagunas o vasos de la geotérmica, existía un sistema lacustre natural conocido como Lago Volcano (Nelson, 1921), el cual era parte del hábitat original del pez cachorrito del desierto (*Cyprinodon macularius*) (Follett, 1960). Actualmente, las altas concentraciones salinas en los vasos construidos de la planta geotérmica funcionan como una barrera química para la invasión de peces exóticos y favorece la abundancia del pez cachorrito al no tener competencia, además de evitar la degradación del sistema y desecación por el ganado. Asimismo, este complejo de vasos posee agua durante todo el año y brindan biotopos de descanso, reproducción y alimentación para aves migratorias y residentes (Varela-Romero et al., 1999, 2002).

Para proteger este sistema transformado y de gran importancia biológica es necesario que la planta de geotermia cuente con un plan de manejo para el complejo de lagunas y de la población del pez cachorrito. En orden para llevar a cabo este plan es indispensable aplicar el método de Presión- Estado- Respuesta (PER), el cual fue propuesto por la OCDE (1994), que

establece que las actividades humanas ejercen una presión sobre el ambiente afectando la calidad de sus elementos y la cantidad de sus recursos (estado); ante lo cual se responde a través de políticas ambientales, económicas y sociales, así como cambios en la percepción y paradigmas (respuesta). Este modelo tiene la ventaja de destacar las relaciones en un esquema de la realidad, además de que se puede ajustar para un mejor detalle o para incorporar datos delicados. Las respuestas deberán estar respaldadas por instrumentos de políticas ambientales y referirse a acciones de manejo ambiental orientadas a mitigar o prevenir los efectos negativos de las actividades, disminuir el daño causado, prevenir la pérdida de los recursos naturales y conservar a las especies.

El modelo PER se construye a partir de índices e indicadores para medir la presión y el estado, lo que nos permite tomar decisiones sobre las actividades que ayuden a mantener la calidad del ambiente y puedan ser aplicadas en un futuro. Para la elección de los indicadores es necesario tomar en cuenta que sean fáciles de medir, que enfatizen lo sensitivo en el sistema, que respondan al estrés de una manera predecible, que sean anticipativos, que predigan cambios que pueden abatirse con el manejo, que sean integradores, que tengan respuesta a disturbios antropogénicos y cambios a través del tiempo, y que tengan baja variación de respuesta (Dale et al. 2001).

## Marco conceptual

En la construcción de nuestro modelo PER, la Presión y el Estado están definidos por indicadores de ecología poblacional y de análisis de amenazas, que son complementados con indicadores de ecología del paisaje, la cual ha tenido aportaciones en el carácter ictiológico (Esselman et al., 2011; Kim et al., 2011; Scheffer et al., 2006 y Faush et al., 2002) y a las prácticas concretas de gestión y planificación del territorio (Liu et al., 2005; Bissonette et al., 2003; Freemark et al., 1993; Akzakaya et al., 2006 y Bonnell, 2009), además tiene un enfoque transdisciplinario pero con una aportación de la geografía y la ecología (Vila et al., 2006).

## Fundamentos de Ecología del Paisaje

La ecología del paisaje se fundamenta en tres características o atributos que están relacionados con la estructura, la funcionalidad y el cambio, por lo que la base para la interpretación del paisaje es el concepto de mosaico. Forman y Gordon (1981) propusieron la distinción de diferentes elementos que se podían distinguir en el paisaje, en el cual el elemento dominante sería la matriz, mientras que los parches y los corredores son elementos lineales (Fig. 3). Así, un grupo de parches constituyen el mosaico y un grupo de corredores una red, entre éstos se pueden distinguir bordes de interior y exterior, además de que se puede encontrar el arreglo espacial de los parches, permitiéndonos encontrar diferencias estructurales de dos paisajes (Burel et al., 2003).

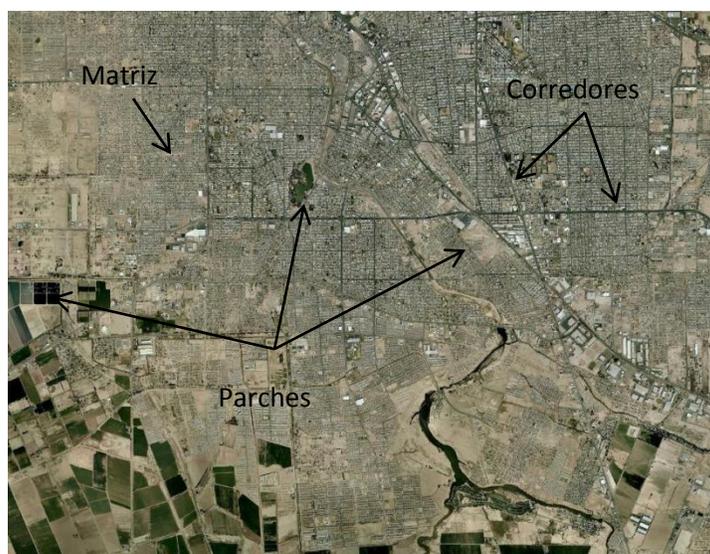


Figura 3. Elementos del paisaje en el Valle de Mexicali basados en Forman y Gordon (1981).

De acuerdo con Forman (1995), los componentes del mosaico son representados comúnmente por los parches individuales, mismos que se encuentran inmersos en la matriz; la forma (regular e irregular) y el tamaño de los parches son elementos importantes para los flujos bióticos y abióticos, por lo que se pueden clasificar en parches estructurales que suelen estar representados por (1) la composición del suelo y la vegetación, (2) los factores de recursos que mayormente se relacionan con la ecología de los animales (e.g., ámbito hogareño donde se encuentra el alimento), (3) los factores de hábitat que pueden ser de diferentes comunidades y comúnmente más grandes que el ámbito hogareño y (4) los factores de corredor, que es una parte del paisaje que utiliza un organismo para moverse, explorar, dispersarse y migrar (Forman, 1995).

### **Fragmentación**

Las aproximaciones cuantitativas al estudio del paisaje se basan en tres términos, la fragmentación, conectividad y heterogeneidad. El término de fragmentación se confunde con la pérdida de hábitat que sucede cuando una parte del paisaje es transformada a otro tipo de cobertura u otro uso, en contraste el hábitat fragmentado denota un proceso espacial de conversión paisajística, también se refiere a romper un entero en pequeñas piezas. En la actualidad y en los procesos reales es imposible tener hábitats fragmentados sin pérdida de hábitats pues la creación de fragmentos necesita cambios en el paisaje (Collinge et al., 2009). Otra definición para la fragmentación de hábitat en la cual se toma en cuenta la parte conceptual y teórica, en la cual incluyen los efectos de la composición del hábitat y los hábitats desaparecido en las especies, la escala y la selección de hábitat dependiendo de los ámbitos geográficos de determinada especie, es definida por Franklin et al. (2002) como sigue:

“...la discontinuidad, resultante de un conjunto de mecanismos, en la distribución espacial de los recursos y condiciones presentes en un área a una escala determinada que afecta la ocupación, reproducción, o supervivencia de una especie. De esto, el proceso de fragmentación de hábitat se puede definir como el conjunto de mecanismos que llevan a la discontinuidad en la distribución espacial de recursos y condiciones presentes en un área a una escala dada que afecta la ocupación, la reproducción y la supervivencia de una especie”.

## **Conectividad**

Uno de los problemas centrales en la ecología del paisaje es el cambio drástico de los paisajes junto con las presiones antropogénicas, lo que provoca una pérdida de hábitat y fragmentación para muchas especies, por lo que las especies necesitan de redes de parches que estén bien conectados para sobrevivir, ya que la recolonización depende de la disponibilidad de dispersión de los individuos y la facilidad con la que se puedan mover por el paisaje, llamándolo conectividad (Kindlmann et al., 2008).

La conectividad ha sido descrita como el grado con el cual el paisaje facilita o impide el movimiento de organismos a través de los parches. En este atributo se distinguen dos definiciones básicas: (1) la conectividad estructural que se basa enteramente en el acomodo del paisaje con ninguna relación a los organismos, y (2) la funcional que considera la conducta de los organismos a elementos individuales del paisaje (parches y bordes) y su configuración espacial de todo el sistema (Luque et al., 2012). Es recomendable distinguir entre la conectividad del paisaje, donde la conectividad es una propiedad del paisaje entero, y de la conectividad de los parches, que identifica la conectividad como un atributo de un parche y es típicamente usada para definir metapoblaciones. Las medidas se basan en presencia, ausencia o configuración de los corredores (que son líneas estrechas y continuas de hábitats que estructuralmente conectan a dos parches no contiguos), esto no implica que se puede aplicar en general, pues para cada especie u organismo la posibilidad de utilizar un corredor es diferente (Kindlmann et al., 2008).

## **El concepto de Metapoblación**

Virtualmente todas las especies viven en poblaciones con cierto grado de estructura espacial más amplio que otras poblaciones discretas, las cuales son completamente independientes una de la otra, para una población mixta grande. La metapoblación se encuentra en un escenario de poblaciones discretas, en donde existe una serie de débiles interacciones entre poblaciones locales, lo cual equivale a tener una población de poblaciones. Además se asume que el número de las poblaciones locales está determinado por las colonizaciones y extinciones, procesos ecológicos que caracterizan a las metapoblaciones (Van Nouhuys, 2009).

En la teoría de la biogeografía insular de MacArthur y Wilson (1967) se enfatizan los procesos de colonización y extinción para explicar los patrones de la riqueza de especies, la cual corresponde con aquella de metapoblaciones propuesta por Levins (1969). A partir de estas teorías han surgido diferentes estructuras poblacionales (Fig. 4), con diferente dinámica y con una estructura muy parecida pues están separados espacialmente en forma de parches dentro de un paisaje, pero funcionalmente difieren. La metapoblación clásica de Levins (Fig. 4a), consiste en parches de hábitat que difieren en tamaño, aislamiento y calidad, donde cada parche tiene la misma probabilidad de extinguirse y recolonizarse, y una dinámica de parches asincrónica, que la dinámica de cada hábitat es diferente una de otra. Otra variación es el sistema de Isla-Continente (Fig. 4b), descrita por Harrison (1988), aquí la probabilidad de extinción es diferente en los parches, al igual que el tamaño poblacional, donde las poblaciones en parches pequeños pueden extinguirse periódicamente, pero los parches grandes persisten indefinidamente igual que Fuente–Sumidero (Fig. 4b) descrita por Pulliam (1991), excepto que la designación de una población como Fuente o Sumidero depende de la calidad del hábitat y no necesariamente del tamaño del parche; la “Fuente” se define como poblaciones con crecimiento positivo que exporta el excedente de individuos a poblaciones adyacentes, por otra parte las poblaciones “Sumidero” son las que tienen un crecimiento negativo que es sustancialmente vía inmigración. Otra alternativa es la de población parchada “Patchy” (Fig. 4c), que realmente no es una metapoblación del todo, pero es una sola población grande que ocupa varios parches de un hábitat. Otra estructura es la de Desequilibrio (Fig. 4d), la cual es de mayor problema para la conservación, esto es porque las poblaciones están muy aisladas que la migración entre poblaciones no existe, además de que no se salvan de la extinción y no hay recolonización, así que si una población se extingue no hay esperanza para restablecerla. Cabe mencionar que funcionalmente una metapoblación puede tener más de uno de estos tipos de dinámica en diferentes partes de su metapoblación (Hanski et al., 2003 y 2004).

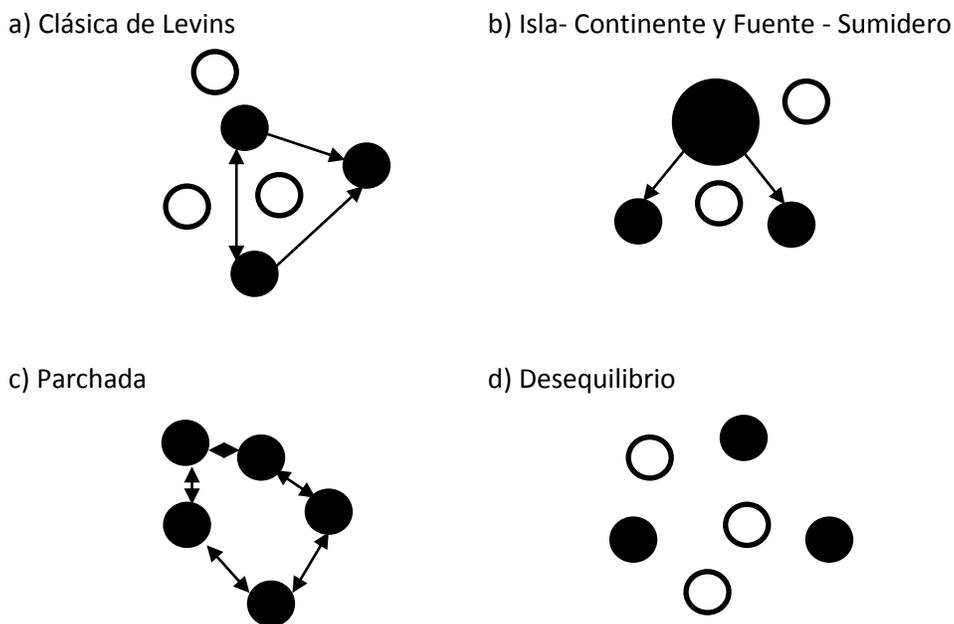


Figura 4. Estructuras metapoblacionales: a) Clásica de Levins, b) Isla – Continente y Fuente – Sumidero, c) Parchada, y d) Desequilibrio. Las flechas representan el desplazamiento poblacional, los círculos claros representan parches disponibles y los círculos oscuros las poblaciones locales.

### Métricas del paisaje

Las métricas del paisaje o índices del paisaje aportan datos numéricos sobre la composición y la configuración de los paisajes, la proporción de cada cubierta del suelo o la superficie y la forma de los elementos paisajísticos, además, los índices permiten una comparación útil entre distintas configuraciones, la misma área en distintos momentos y la definición de escenarios futuros (Neel et al., 2004).

También se pueden diferenciar cinco grandes tipos de métricos del paisaje: (1) Índices de área, superficie, densidad y variabilidad, un tipo de índices centrados en las características de dimensión y en el número de parches que conforman el área de estudio; (2) Índices de forma, fundamentados en las características de forma de los parches que constituyen un determinado paisaje; (3) Índices de ecotono y hábitat interior, permiten hacer cálculos sobre la amplitud del ecotono, o hábitat de borde, en relación con el hábitat interior; (4) Índices de distancia, vecindad y conectividad, calculan la distancia desde el hábitat de borde y ecotono de un parche hasta el parche más próximo al mismo tipo; (5) Índices de diversidad del paisaje, éstos aportan

información para comparar distintos paisajes o la evolución de un paisaje en diferentes momentos históricos (Vila et al., 2006).

Dentro de los tipos de métricas anteriormente explicadas, existe una gran variedad de éstas que son ampliamente utilizadas pero para los propósitos que nos conciernen se describirán solamente tres (cf. Leitao et al., 2006):

(1) Proporción de área por clase (CAP) es simplemente la proporción de la composición del paisaje de una cobertura en particular, se refiere a la abundancia de los tipos de parche en el paisaje pero sin considerar la parte espacial, la colocación o el lugar dentro del mosaico, CAP se puede expresar en forma de porcentaje multiplicándolo por 100 y si es así, se le conoce como porcentaje del paisaje (PLAND). Se recomienda utilizar en conjunto con otro o más índices (media de parches "AREA\_MN" o densidad de parches "PD"), para diferenciar la matriz, para identificar y cuantificar coberturas raras o poco comunes en las cuales hay que considerar en un plan de manejo, y es muy útil para caracterizar la uniformidad de un paisaje, el cual es un componente importante de la diversidad paisajística (gran uniformidad implica gran diversidad).

(2) Número de parches (PN), es simplemente el total de parches y se puede aplicar a nivel paisajístico o clases, el nivel de clases incluye todos los parches de una cobertura específica, esta es una métrica de configuración paisajística. Comparar valores de PN de muchos paisajes con variación en el tamaño y acomodo es un problema que para solucionar se utiliza la densidad de parches (PD) que normaliza a PN dividiendo lo por el tamaño del paisaje. Cuando el área de las clases es constante PN funciona como un buen índice de la fragmentación y heterogeneidad para comparar paisajes. PN se aplica cuando se están considerando especies de un tipo de hábitat específico dentro de una metapoblación sirve como sustituto para el número de subpoblaciones el cual influencia la dinámica y la persistencia de las metapoblaciones. Se recomienda que se utilice con las métricas de área de parches (PA), proporción de área por clase (CAP), tamaño de parche (AREA\_AM), radio (GYRATE), proximidad (PROX) y forma del parche (SHAPE), en conjunto la complejidad del paisaje es más completa ya que describe la distribución espacial, la forma y la conectividad de los parches.

Para analizar la distancia de un parche a otro del mismo tipo de cobertura se utiliza la métrica de la distancia euclidiana del vecino más cercano (ENN), este es un índice para la configuración del paisaje porque es explícitamente relativo con la locación, el arreglo y la caracterización de la distribución espacial de los parches. En la aplicación sus derivados describen una media de análisis matemáticos de la distribución de coberturas en el paisaje, es considerada en las teorías de la biogeografía insular y metapoblación y en la fragmentación, ya que la distancia es lo más importante.

Por último, (3) El índice de proximidad (PROX) es una medida sin unidades del aislamiento de los parches que integra información sobre el tamaño y la distancia de un parche a otro específico o focal con un radio definido. Como de esta métrica se obtienen valores sin unidades, se utiliza para la comparación de diferentes parches o para la configuración espacial en diferentes paisajes, otra aplicación es para priorizar y adquirir reservas para la vida silvestre pues utilizando como radio el ámbito hogareño de alguna especie se puede determinar la proximidad relativa de los hábitats. Por otra parte, PROX ofrece un entendimiento importante dentro del arreglo espacial de los parches relativos a otros parches del mismo tipo.

De esta forma, el uso de las métricas del paisaje contribuye a determinar el estado del sistema y la condición de la población, que son elementos claves para la construcción de estrategias de conservación de especies amenazadas o en peligro de extinción, como es el caso del pez cachorrillo del desierto (*Cyprinodon macularius*). Todo ello es necesario para generar un plan de manejo para el sistema lacustre de la planta geotérmica de Cerro Prieto, considerando la gran importancia biológica como hábitat de esta especie y de la avifauna migratoria y residente que utiliza estos biotopos para alimentación, descanso, reproducción y refugio (Ruiz-Campos et al., 2012; Varela-Romero et al., 2002).

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Generar una propuesta de manejo para el pez cachorrillo del desierto en peligro de extinción (*Cyprinodon macularius*) en los vasos de la planta geotérmica de Cerro Prieto, con base en el análisis integral de atributos de tipo poblacional, hábitat, paisajísticos y amenazas

### **Objetivos específicos**

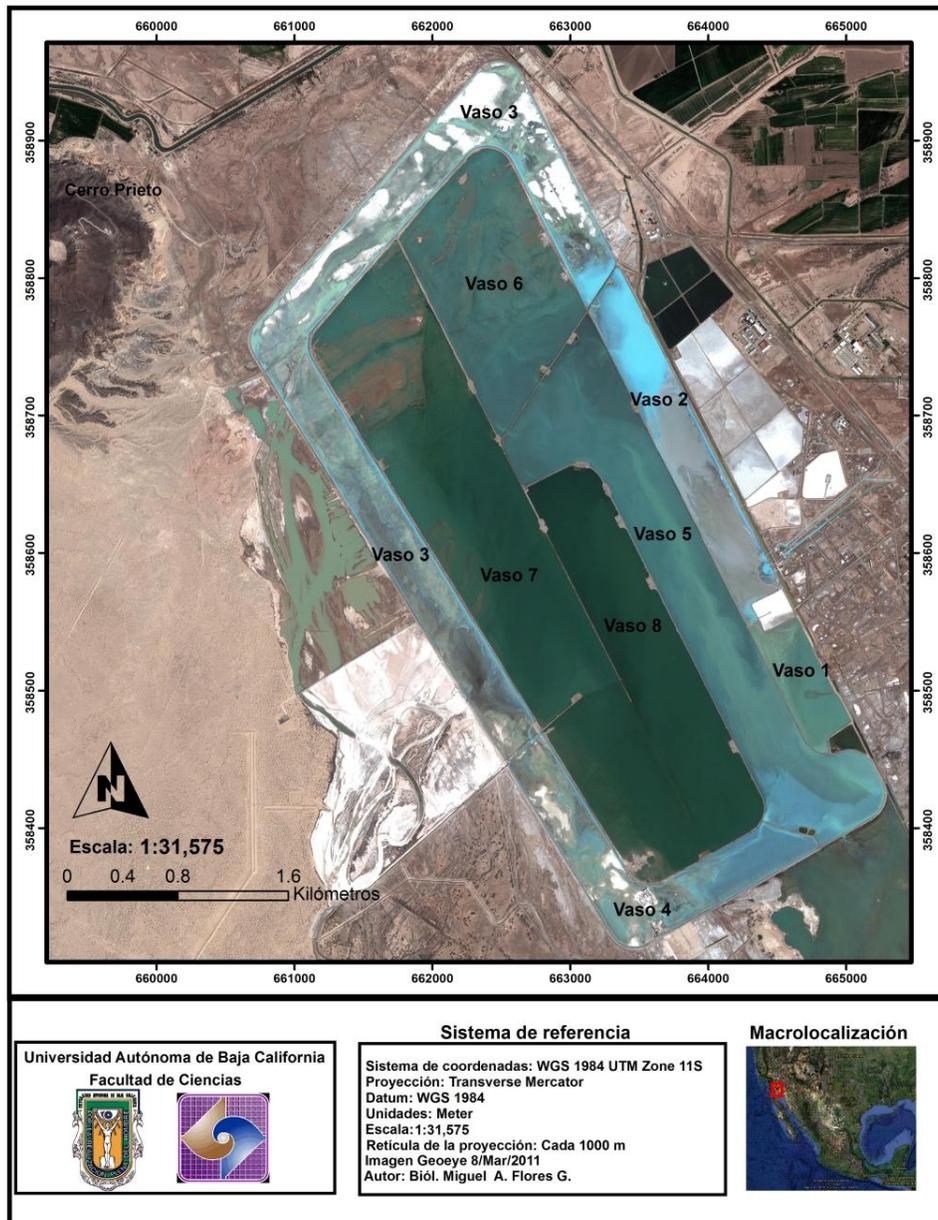
1. Analizar la estructura y abundancia poblacional, por talla y sexo del pez cachorrillo, en las diferentes unidades de hábitat de este complejo lacustre.
2. Caracterizar la distribución espacial del pez cachorrillo del desierto en los vasos de evaporación de la planta geotérmica de Cerro Prieto.
3. Evaluar el patrón del paisaje actual, así como los procesos que permiten la presencia de la especie en el sistema lacustre.
4. Identificar las amenazas del sistema para la conservación del pez cachorrillo y sus hábitats.
5. Generar una propuesta de manejo para esta especie y sus hábitats.

## Área de estudio

El Campo Geotérmico de Cerro Prieto está ubicado a 30 km al sureste de la ciudad de Mexicali, Baja California, México. Este campo comenzó sus operaciones en 1973 y desde entonces ha extraído vapor geotérmico para la generación de energía eléctrica. Actualmente tiene una capacidad de 720 MW (Megavatios), extrayendo aproximadamente 5800 toneladas por hora (tons/h) de vapor. Se cuenta con un total de 353 pozos perforados, de los cuales 172 se encuentran en procesos productivos (Dumas, 2010).

En el mismo Campo Geotérmico se encuentra la laguna de evaporación en las coordenadas 115°33'32"24'06" N y 115°16'06" W. Históricamente en este lugar predominaban terrenos pantanosos cuya agua provenía de manantiales, géiseres y de algunas descargas de drenes agrícolas provenientes del valle (Alonso, 1964). Ahora es un área transformada por el hombre para cumplir como zona de descarga para el agua residual del proceso de crear energía a partir del vapor caliente, cuanta con un espejo de agua de 16 km<sup>2</sup> durante todo el año, éste se divide en siete vasos que están distribuidos en forma de caracol donde por medio de la decantación se azolva el sílice que contiene el agua residual y una vez en el vaso central ésta es reinyectada al subsuelo (Fig. 5).

La vegetación que actualmente se encuentra en el área son halófilas y una de las especies más comunes es *Allenrolfea occidentalis*, un arbusto leñoso de aproximadamente de 30 cm a un metro de altura cuyas semillas resisten altas temperaturas y altos niveles de salinidad sin perder calidad para germinar, su periodo de crecimiento es de mayo a noviembre y durante tal son sometidos a una variación de condiciones edafológicas (Gul et al., 2001). Otra planta presente es el pasto marino (*Ruppia maritima*), el cual es común en sitios con agua salada, se encuentra en formaciones tipo rizoma, coloniza nuevos sedimentos por su gran producción de semillas, el tamaño máximo lo obtienen en abril a mayo y junio a julio, se reproduce en temperaturas de 22° C a 25° C y comienza con el agua cálida de primavera terminando con las altas temperaturas de verano ya que se encuentra en intervalos de 13° C a 39.5° C, y se encuentra en agua con 25 a 32 ppt de salinidad, e incluso tolerando salinidades hasta de 70 ppt (Ailstock et al., 2004).



**Figura 5. Área de estudio: laguna de evaporación de la geotérmica de Cerro Prieto, demostrando el sistema de vasos para el manejo del agua residual y su final reinyección.**

El clima en esta área corresponde a un clima seco muy árido, con temperatura media anual por encima de los 22°C, la precipitación anual va de 42.3 mm a 83.6 mm siendo de mayor incidencia los meses de agosto a octubre y en un segundo período en diciembre y enero. La humedad relativa media anual es de 45.9%, llegando a descender en algunos meses hasta el 10%. La evaporación media anual es de 2.598 mm y los vientos dominantes provienen de dos

direcciones opuestas, y se presentan en dos diferentes épocas del año, de diciembre a mayo provienen de noroeste con una velocidad promedio de 2.23 m/s y durante los meses de junio a noviembre provienen principalmente del sureste con una velocidad promedio de 2.29 m/s (Comisión Federal de Electricidad, 2010).

En la parte de la geología se encuentran rocas batolíticas del Cretácico 120 millones de años, que forman gran parte de la Sierra Cucapá y de la Sierra El Mayor, siendo de composición granítica a tonalítica. Las rocas sedimentarias del Terciario datan de 13.5 a 1.8 millones de años, compuestas por una secuencia de lutita intercalada con areniscas de cuarzo de grano fino a medio, donde se aloja el yacimiento geotérmico. A los depósitos aluviales del Pleistoceno y Reciente de 1.8 millones de años a 100,000 años, se les conocen como sedimentos clásticos no consolidados y están conformados por secuencias de arenas, gravas y arcilla plástica, cuyo espesor es de 500 a 2300 metros. Las rocas ígneas extrusivas del Cuaternario están presentes en el volcán Cerro Prieto, siendo de composición andesítica a riodacítica (Dumas, 2009).

En el Campo Geotérmico se encuentran tres fallas: la falla de Cerro Prieto que discurre de NE-SO, es un sistema del tipo dextral que se extiende desde el centro de dispersión de Cerro Prieto hasta la Cuenca de Wagner; esta falla se extiende 34 km adicionales al noroeste desde su último afloramiento reconocido, siendo la estructura que marca la frontera entre las Placas de Norteamérica y del Pacífico en el Valle de Mexicali, teniendo un desplazamiento promedio mayor a 50 mm al año. El Sistema de Fallas H, que va de NE-SO, es producto de los esfuerzos de tipo dextral entre la falla Imperial y el sistema de fallas Cerro Prieto, y la falla Michoacán que pertenece al mismo sistema de fallas Cerro Prieto, que va de NO-SE. Esta estructura y la falla Cerro Prieto forman un "horst" o bloque levantado que se acuña al sur (Morales et al., 2011).

## **Metodología**

Para la elaboración de esta propuesta de manejo del pez cachorrito del desierto (*Cyprinodon macularius*) en la laguna de evaporación de Cerro Prieto, con base en sus atributos poblacionales y de hábitats, así como de los aspectos paisajísticos y las amenazas, en el presente estudio de carácter interdisciplinario se ha utilizado la metodología denominada presión-estado-respuesta (PER). Esta metodología fue originalmente propuesta por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD), y es utilizada para determinar cuál es el estado que presenta un recurso natural, analizar las presiones que existen sobre tal recurso y cuáles son las respuestas de la comunidad académica para el uso, conservación y/o protección del mismo (OECD, 1993).

## **Estado**

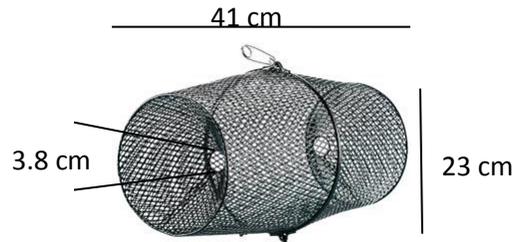
Para evaluar el Estado se tomaron en cuenta la parte de ecología poblacional del pez cachorrito del desierto (*C. macularius*), la cual involucra la abundancia relativa, la proporción de sexos, la estructura poblacional por tallas, los diferentes tipos de hábitat de distribución, y los aspectos paisajísticos del ecosistema tales como número y tipo de parches, conectividad, fragmentación y tipo de distribución poblacional.

## **Ecología poblacional**

Para valorar los diferentes tipos o unidades de hábitat identificados en el área de estudio se tomaron las características físicas y biológicas de cada uno de ellos, siendo éstas la identificación de la vegetación acuática y terrestre presente, el tipo de sistema acuático, y la medición “*in situ*” de parámetros fisicoquímicos del agua mediante un equipo multianalizador Hydrolab Scout 2. Los parámetros fisicoquímicos medidos fueron oxígeno disuelto (mg/l), porcentaje de saturación de oxígeno (%), temperatura (°C), potencial de iones hidrógeno (pH), conductividad (mS/cm) y salinidad (ppt). Los valores registrados de cada uno de estos parámetros fisicoquímicos fueron graficados con el programa STATISTICA 8.0.

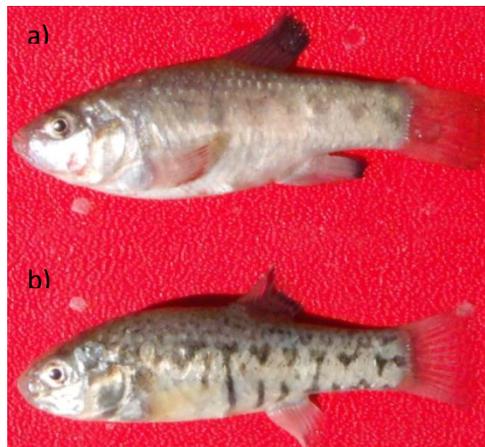
Para determinar la abundancia del pez cachorrito en el área de estudio, se efectuaron cuatro muestreos durante los meses de marzo y septiembre de 2011, y marzo y junio de 2012. Los peces fueron capturados con artes de recolecta pasiva, utilizando trampas tipo “minnow”, las

cuales fueron cebadas con malvaviscos para atraer visual y olfativamente a los peces (Fig. 6). En cada evento de recolecta se colocaron 17 trampas de manera sistemática en los diferentes tipos de hábitat de la laguna con una separación entre trampas de aproximadamente de 200 metros, durante un tiempo medio de operación de 20 horas (Hubert, 2012).



**Figura 6. Trampa tipo "minnow", con sus respectivas dimensiones.**

Una vez transcurrido el tiempo, las trampas se recuperaron una por una, colocadas en un contenedor con agua de la misma laguna a fin de proceder con el conteo y sexado de los ejemplares capturados y la toma de datos biométricos. Cada pez capturado fue medido con un vernier (precisión 0.1 mm) en longitud total (LT) y determinado su sexo basado en su patrón de coloración (Fig. 7); una vez terminado el proceso de medición y de sexado de los ejemplares en cada trampa se procedió a regresarlos a su lugar original de captura.



**Figura 7. Dimorfismo sexual en la coloración en *Cyprinodon macularius*: (a) macho, y (b) hembra. Fotografía por Miguel Flores.**

Se calculó la abundancia relativa del pez cachorrillo en cada una de las lagunas, tanto a nivel de sexos como total (sexos combinados). La abundancia es aquí expresada como captura por unidad y esfuerzo (CPUE) y consiste en estandarizar la abundancia absoluta en función del esfuerzo de muestreo ejercido. Este procedimiento permite realizar comparaciones entre las mismas muestras y otros eventos pasados o futuros (Nielsen, 1983). El CPUE se calcula como número de individuos capturados/número de trampas colocadas/tiempo de operación de las trampas.

En cada evento de muestreo se calculó la proporción sexual, dividiendo el número de machos entre el número de hembras. Para comparar la proporción de sexos observada en relación a una proporción hipotética esperada de 1:1, se realizó una prueba de Ji-Cuadrada ( $\chi^2$ ) con un nivel de significancia de 0.05 (Sokal, 1981).

La estructura de talla de la población total o por sexo en cada evento de muestreo fue representada mediante un histograma de frecuencia de tallas, utilizando un ancho de clase de 1 mm (Varela-Romero et al, 1999). La estructura poblacional total se comparó con aquella de recolectas pasadas en los años de 1999-1997 (Varela-Romero et al., 1999) y 2005-2006 (J. Alaníz-García, datos no publicados).

### **Evaluación del patrón del paisaje**

Para establecer la distribución espacial del pez se utilizaron las coordenadas de los lugares de muestreo utilizando el programa ArcGIS 10.0 y una imagen georreferenciada del satélite Geoeye con una resolución de 0.8 m por pixel; estos puntos fueron colocados junto con la abundancia del pez, siendo ambos analizados para identificar el tipo de distribución de la población de acuerdo con lo señalado por López (2000), en el sentido de que *“las metapoblaciones pueden adquirir casi cualquier arreglo espacial dependiendo del tipo de organismo que se trate y del entorno”*. Asimismo, se utilizó el ámbito de dispersión conocido de *Cyprinodon macularius* (Sutton, 2002) para identificar las poblaciones locales.

En la caracterización del hábitat para la evaluación del patrón del paisaje se realizó una digitalización de un mosaico de nueve imágenes GeoEye del área de estudio que se tomaron el 8 de marzo de 2011 vía Google Earth Plus 6, con una resolución Premium de 4800 X 4018 cada

una. En estas imágenes se identificaron las diferentes coberturas: zonas inundables, zonas inundadas, canales y vegetación (acuática y marina).

Posteriormente, utilizando el ámbito promedio de dispersión de *Cyprinodon macularius*, se zonificó el área de la laguna de evaporación de Cerro Prieto con el propósito de obtener las unidades, mismas que se evaluaron y caracterizaron individualmente.

### Indicadores del Estado

Para obtener los indicadores del estado se utilizaron la variedad de hábitat, la conectividad y la distribución potencial, todas ellas calculadas para cada unidad. En el primer caso se utilizó la métrica del paisaje Número de Parches (PN) (Leitao et al., 2006), que es la suma de todos los parches de diferentes coberturas en el paisaje y está dado por la fórmula:

$$PN = \sum_{i=1}^n P^i$$

Dónde:

$P_i$  = Tipo de parches  $i$

Para el segundo caso que fue la conectividad, se utilizó otra métrica del paisaje la distancia euclidiana del vecino más cercano (ENN) (Leitao et al., 2006), que consiste en la distancia de un parche a otro de la misma cobertura; a esta métrica se le obtuvo el promedio por unidad mediante la siguiente fórmula:

$$ENN_{MN} = \frac{\sum_{j=1}^{n^1} b_{ij}}{n_i^1}$$

Dónde:

$b_{ij}$  = La distancia al parche más cercano del mismo tipo  $i$  a un parche específico  $j$ .

$n_i^1$  = El número de parches correspondientes a la misma cobertura.

Para el tercer indicador que es la distribución potencial (DIPOT), se realizó una relación entre el tipo de hábitat y la abundancia absoluta del pez cachorrito del desierto. Los datos de abundancia fueron normalizados con el método de Weitendorf (Turskis et al., 2009):

$$b_y = \frac{a_y - \min a_y}{\max a_y - \min a_y}$$

Dónde:

$a_y$ = Valor a normalizar.

$\max a_y$ =Valor máximo de los datos.

$\min a_y$ = Valor mínimo de los datos.

A fin de ponderarlos con los diferentes tipos de hábitat, ya que cada unidad posee diferentes tipos de hábitat, por lo que la sumatoria de éstos arrojó el valor de DIPOT respectivamente para cada unidad.

## **Presión**

En este apartado se aplicó el método propuesto por The Nature Conservancy “La planificación para la conservación en sitios” este incluye la identificación de los objetos de conservación, la identificación de los impactos y sus fuentes, la evaluación de los grupos o individuos que hacen uso de los recursos y el desarrollo de estrategias de conservación para los impactos y sus fuentes (Andrade et al, 1999).

En la identificación de impactos y sus fuentes se realizó una matriz numérica con coeficientes de ponderación, la cual permitió priorizar las amenazas. Esta ponderación tiene una escala de cuatro categorías: 4 (muy alto), 2 (alto), 1 (medio) y 0.5 (bajo). Para construir la matriz, primero se evaluó el objeto de conservación tomando los siguientes criterios para estos atributos:

Contribución al macroecosistema, que es la importancia para el sistema global, donde 4 es una contribución muy importante, 2 es una contribución importante, 1 es poca contribución, y 0.5 equivale a casi ninguna contribución. La rareza, la cual consiste en reconocer alguna presencia de especies en peligro de extinción o amenazadas; ésta se pondera con 4 si está en peligro de extinción, 2 si está amenazada, 1 si está vulnerable, y 0.5 si está indeterminada. La calidad, aquí

se toma en cuenta el estado de conservación del sistema, dando el valor de 4 a uno de los mejores o únicos ejemplos de conservación del sistema a escala mundial o macroregional, 2 si es un buen ejemplo de este sistema en el mundo o macroregión, 1 si es un ejemplo promedio de este sistema en el mundo o macroregión, y 0.5 si es un ejemplo no destacado de este sistema a escala mundial o macroregional. Y el valor como herramienta o carisma, donde se toma el valor potencial económico, político, ecoturístico y educacional, además de la presencia de especies bandera; este atributo es ponderando con 4 en el caso de ser muy importante o potencialmente importante, 2 si es útil o potencialmente útil, 1 si tiene un valor limitado, y 0.5 si su valor es escaso. El valor para el objeto de conservación se obtiene con el promedio de la puntuación de cada atributo.

Después se evaluaron los impactos utilizando las perspectivas de severidad (lo que el impacto está causando) y el alcance (lo que el impacto está afectando) con los siguientes criterios:

Para la severidad se ponderó como 4 a la destrucción o eliminación de ese sistema, 2 a la degradación significativa de ese ecosistema, 1 para alguna degradación del sistema, y 0.5 para un deterioro leve del sistema. Y para el alcance, se asignó 4 a todo el sistema, 2 a buena parte del sistema, 1 a algunas partes del sistema, y 0.5 a partes pequeñas o aisladas del sistema. El valor de los impactos se obtiene del promedio de estas dos perspectivas.

Por último, las fuentes se evaluaron con las contribuciones actuales y futuras de los impactos, basándose en los siguientes criterios:

Ponderando a la contribución actual, se asignó 4 cuando ésta representa la principal causa de este impacto, 2 a una causa adicional e importante de este impacto, 1 a una causa menor de este impacto, y 0.5 a una causa irrelevante de este impacto. Y a su contribución futura, se le asignó 4 en el caso de llegar a ser la causa principal de este impacto, 2 si será una causa adicional e importante de este impacto, 1 si será una causa menor de este impacto, y 0.5 si no contribuirá en forma significativa a este impacto. El valor de la fuente se obtiene del promedio de la contribución actual y futura.

## Indicadores de Presión

Los indicadores que se utilizaron para evaluar la presión fueron los impactos al sistema y la fragmentación, en el primer caso este valor se obtuvo de la multiplicación de los impactos y las fuentes, y en el segundo caso se utilizó la métrica del paisaje Proximity (PROX) (Leitao et al., 2006), que se calcula realizando una circunferencia de una distancia determinada (en este caso 500 metros), tomando un parche objetivo como el centro. Enseguida se divide el área del parche más cercano al parche objetivo (de la misma cobertura) entre la distancia de los mismos, y se obtiene un promedio de todos los valores por unidad y su fórmula es la siguiente:

$$PROX_{MN} = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \frac{a_{ijs}}{b_{ijs}^2}}{n_1}$$

Dónde:

$a_{ijs}$  = área del parche más cercano.

$b_{ijs}^2$  = la distancia entre el parche más cercano y el parche objetivo.

$n_1$  = total de parches correspondientes a la misma cobertura.

## Respuesta

En este apartado los indicadores de presión y estado se normalizaron con el método de Weitendorf (Turskis et al., 2009), para ser utilizados en el índice de Presión y Estado (PreEst), el cual se aplicó para cada unidad y está dado por la fórmula:

$$PreEst = \sum Estado + \sum Presión$$

El resultado del índice se visualizó espacialmente en el mapa realizado en Arcgis 10.0 y por el método de cuartiles se generaron con dicho programa cuatro clasificaciones para identificar la calidad del estado.

A continuación se realizó una matriz de clasificación de los actores potenciales para el manejo del área, tal como lo proponen Sorensen et al. (1992), quienes los clasificaron como locales, regionales, nacionales e internacionales; siendo estos actores los funcionarios públicos,

agencias de gobierno, sector privado, instituciones de asistencia, comunidad científica, OSC's y vecinos.

Subsecuentemente se elaboró un análisis FODA con el objetivo de identificar a nivel sistema cuales son las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas del sistema, siguiendo las recomendaciones de Blake et al. (2005), donde las fortalezas son las características que dan calidad al sistema, las oportunidades son las situaciones favorables para el ambiente que puedan realizarse para mejorar o mantener su estado, las debilidades son las características que dañan o mantienen una baja calidad al sistema, y las amenazas son acciones que probablemente causen una disminución en la calidad del sistema incluso la desaparición del mismo.

Posteriormente se tomaron del análisis de amenazas los impactos categorizados para realizar propuestas de manejo a nivel unidad las cuales son descritas por un proyecto para cada impacto, dentro se enlistan las actividades, los responsables y la priorización. Finalmente del análisis FODA se tomaron las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas para las propuestas a nivel sistema, las cuales incluyen lo especificado anteriormente.

## Resultados

### Parámetros fisicoquímicos

Los valores obtenidos de los parámetros fisicoquímicos durante el muestreo en la laguna de evaporación de Cerro Prieto se detallan en la tabla I. Los valores de temperatura fueron mayores durante junio de 2012 en los vasos 5, 6 y 7, con valores que oscilaron entre 32.9 y 36.2°C; mientras que en marzo de 2011 se registraron los valores menores en los vasos 3 y 4, con valores de 12.3 a 17.5 °C. Cabe señalar que la temperatura en el cárcamo de bombeo que recoge el agua residual de la planta geotérmica, se registraron temperaturas muy altas en el orden de 44.5 °C y 45.5 °C (marzo de 2012). Para el parámetro de salinidad que está ligado con la conductividad, los valores más altos fueron registrados en marzo 2012 en los vasos 6 y 7, con valores oscilando entre 48.7 a 49.0 ‰. El potencial de hidrógeno (pH) registrado durante los cuatro eventos de muestreo se mantuvo en el intervalo de 7.8 a 9.8, mientras que el oxígeno varió de 0.5 mg/l en el vaso 2 (marzo 2012) a 9.7 ml/g en el vaso 4 (marzo 2011).

Tabla I Valores fisicoquímicos del agua, registrados para cada punto y zona de colocación de trampas en la laguna de evaporación de Cerro Prieto, durante los muestreos de 2011-2012.

Fecha	Zona	Temperatura °C	Conductividad (mS/cm)	pH	Salinidad (%)	Oxígeno (g/l)
<b>marzo 2011</b>	Vaso 3	17.5	40.4	9.6	25.7	6.1
	Vaso 3	16.8	40.3	9.6	25.8	7.2
	Vaso 3	15.2	40.8	9.6	26.1	6.8
	Vaso 3	16.3	40.5	9.8	26.0	4.8
	Vaso 3	14.3	40.5	9.5	26.2	8.3
	Vaso 3	14.3	41.1	9.5	26.4	8.0
	Vaso 4	14.3	41.2	9.5	26.4	7.0
	Vaso 4	13.8	41.4	9.4	26.6	8.0
	Vaso 4	12.5	41.6	9.3	26.7	9.2
	Vaso 4	12.3	41.7	9.0	25.8	9.7
<b>septiembre 2011</b>	Vaso 3	36.6	44.4	8.9	28.8	5.6
	Vaso 3	33.8	45.9	8.9	29.3	6.4
	Vaso 3	33.4	44.0	8.7	28.4	5.4
	Vaso 3	32.9	43.8	8.6	28.4	6.6
	Vaso 4	33.1	43.2	8.9	27.8	
	Vaso 4	30.3	44.8	8.8	28.3	
	Vaso 5	27.8	44.1	8.4	28.5	4.6

**Tabla I**  
**Continuación**

	Vaso 8	32.0	31.5	8.2	67.2	7.0
	Vaso 8	32.4	31.2	8.8	66.8	
<b>marzo 2012</b>	Vaso 2	20.1	41.5	8.2	26.6	0.5
	Vaso 2	20.0	41.4	8.3	26.5	2.1
	Vaso 2	22.7	41.7	8.4	26.7	3.9
	Vaso 3	19.3	69.0	8.1	47.1	1.6
	Vaso 3	22.7	41.7	8.4	26.7	3.9
	Vaso 5	20.1	45.7	8.3	29.8	4.1
	Vaso 5	19.8	46.4	8.3	30.1	4.7
	Vaso 5	22.0	46.2	8.4	30.0	3.9
	Vaso 6	21.2	46.7	8.3	30.4	4.8
	Vaso 6	19.5	46.2	9.0	30.1	4.6
	Vaso 7	21.2	68.0	8.3	46.4	3.9
	Vaso 7	21.2	68.0	8.3	46.4	3.9
	Vaso 8	21.0	70.6	8.2	48.4	3.8
	Cárcamo de bombeo	45.5	38.2	8.4	24.4	2.5
	Cárcamo de bombeo	44.5	38.5	8.5	24.4	2.7
<b>junio 2012</b>	Vaso 5	34.7	57.0	7.8	37.9	0.7
	Vaso 5	34.1	57.5	7.9	38.4	1.3
	Vaso 5	32.9	58.7	7.9	39.3	1.5
	Vaso 6	36.1	71.5	7.9	49.0	3.2
	Vaso 6	36.2	71.5	7.9	48.9	3.1
	Vaso 6	36.2	71.5	7.9	48.9	3.0
	Vaso 7	36.1	71.1	7.8	48.7	2.3
	Vaso 7	36.2	71.3	7.9	48.8	3.4
<b>Promedio</b>		25.8	49.1	8.6	34.5	4.1

### **Abundancia relativa, proporción sexual y estructura poblacional**

En la laguna de evaporación de Cerro Prieto se colocaron de manera acumulativa un total de 57 trampas durante los cuatro eventos de muestreo. En promedio por evento de muestreo se colocaron 14 trampas que estuvieron en operación durante 22 horas. Un total de 3097 individuos del pez cachorrillo del desierto fueron recolectados, de los cuales 2417 fueron hembras y 1124 machos. En la tabla II se ilustran los resultados por evento de muestreo.

Tabla II. Número de individuos de *Cyprinodon macularius* por sexo y total recolectados por evento de muestreo en la laguna de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, México.

Muestreo	marzo 2011	septiembre 2011	marzo 2012	junio 2012	2011-2012
Hembras	256	1395	472	294	2417
Machos	32	698	244	150	1124
Total	288	2093	716	444	3097
Número Trampas	17	20	13	7	57
Horas Operación	20	26	23	18	22

La captura por unidad y esfuerzo (CPUE) indicado como el número de individuos capturados/trampa/hora, fue calculado por sexo y total (sexos combinados) en cada uno de los eventos de muestreo. El muestreo de septiembre de 2011 registró el valor más alto de CPUE total (4.03 ind./trampa/h), mientras que el valor más bajo en marzo de 2011 (0.96 ind./trampa/h) (Tabla III). A nivel de sexos, la CPUE fue mayor para los machos (1.34 ind./trampa/h) en septiembre de 2011 y menor para las hembras (0.11 ind./trampa/h) en marzo de 2011 (Tabla III).

Tabla III. CPUE por sexo y combinados en las tres recolectas, y en total, en la laguna de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, México.

Recolecta	marzo 2011	septiembre 2011	marzo 2012	junio 2012	2011-2012
Hembras	0.85	2.68	1.58	2.87	2.11
Machos	0.11	1.34	0.82	1.14	0.94
Total	0.96	4.03	2.39	4.01	3.05

La proporción de sexos de la población del pez cachorrillo del desierto en los vasos de evaporación de Cerro Prieto, registró una dominancia de las hembras en todos los muestreos, como en marzo 2011 donde por cada hembra hay 0.125 machos, esto es, que difiere significativamente ( $P < 0.05$ ) en la proporción de 1:1 (Tabla IV).

Tabla IV. Proporción de sexos hembra:macho (H:M) en las diferentes recolectas y en total en la laguna de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, México.

Recolecta	marzo 2011	septiembre 2011	marzo 2012	junio 2012	2011-2012
Relación H:M	1 : 0.125	1 : 0.5	1 : 0.52	1 : 0.4	1 : 0.45
$\chi^2$	174.22	232.11	72.6	134.83	558.9
$\chi^2$ alfa 0.05	26.3	30.14	21.03	16.92	73.3

La estructura de tallas del pez cachorrito del desierto en la laguna de evaporación de Cerro Prieto para la longitud total (LT) y con un ancho de clase de 1 mm se determinó para dos eventos de muestreo: marzo 2011 y septiembre 2011, en el primer evento para sexos combinados la población estuvo representada por tres grupos modales, el primero termina a los 36 mm, el segundo comienza a los 37 mm y el tercero a los 44 mm en adelante (Fig. 8c), en las hembras estuvo definido por tres clases modales que están en los intervalos de 28-36 mm, 37-43 mm y 44-53 mm (Fig. 8a), mientras que en los machos con igual número de clases sus intervalos oscilan de 30-35 mm, 36-41 mm y 42-50 mm (Fig. 8b).

En el caso de septiembre 2011 para sexos combinados, la población estuvo representada por tres grupos modales, el primero termina a los 37 mm, el segundo comienza a los 38 mm y el tercero a los 46 mm en adelante (Fig. 9c), en las hembras estuvo definido por tres clases modales que están en los intervalos de 27-35 mm, 36-46 mm y 47-64 mm (Fig. 9a), mientras que en los machos con igual número de clases sus intervalos oscilan de 28-36 mm, 37-43 mm y 44-53 mm (Fig. 9b). Además de la comparación de la estructura poblacional del período 2010-2011 versus estructuras de períodos pasados (1996-1997 y 2005-2006) se presenta en la figura 10.

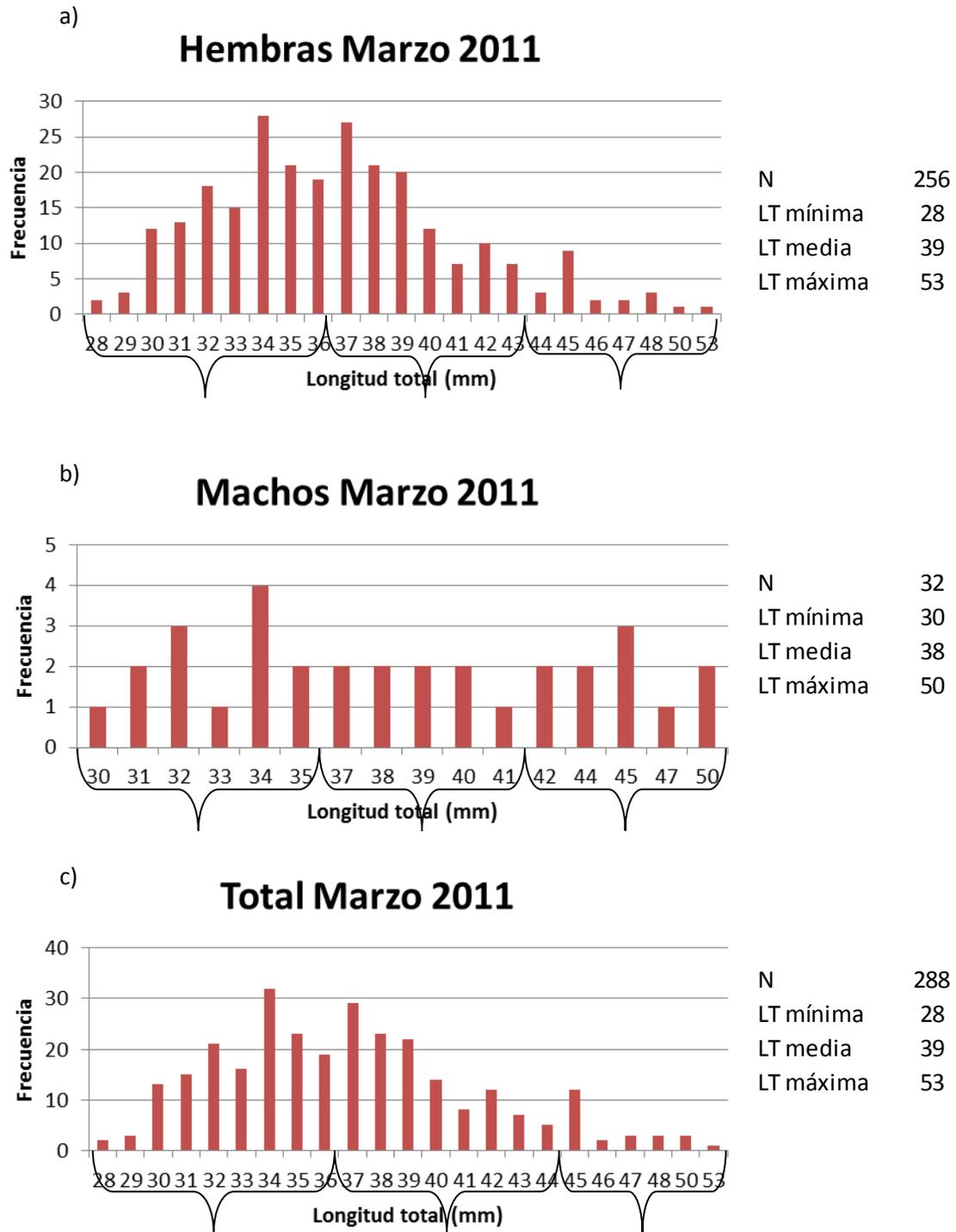


Figura 8. Graficas de la estructura poblacional por sexo y total de *Cyprinodon macularius* en la laguna de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, México, con la longitud total mínima, máxima y media de Marzo 2011.

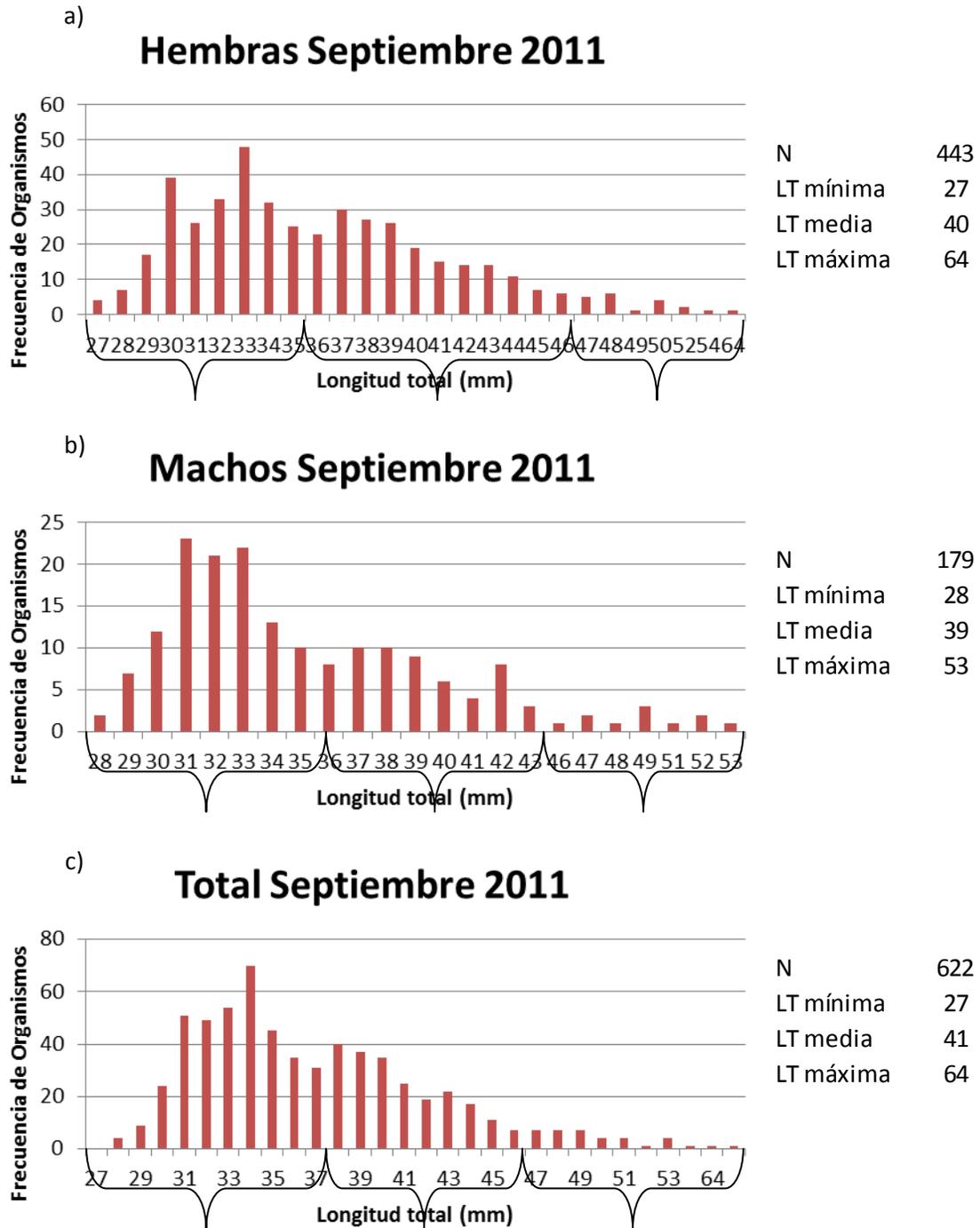


Figura 9. Graficas de la estructura poblacional por sexo y total de *Cyprinodon macularius* en la laguna de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, México, con la longitud total mínima, máxima y media de Septiembre 2011.

## Estructura poblacional

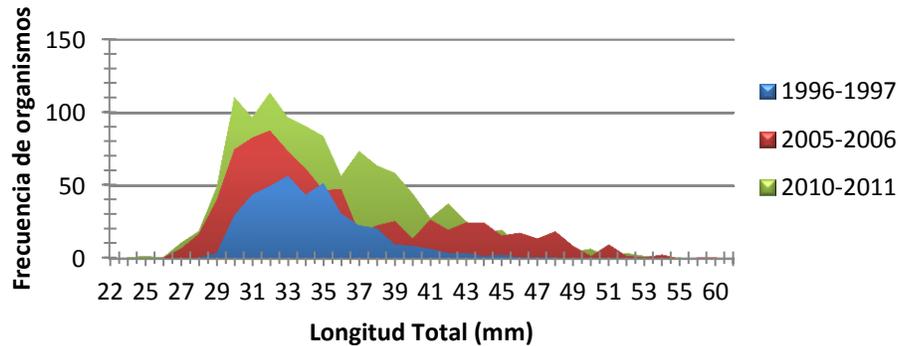


Figura 10. Comparación de la estructura poblacional de *Cyprinodon macularius* en distintos años en la laguna de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, México.

## Tipos de hábitat

Se colocó un total de 57 trampas tipo “minnow” (Fig. 11), en los diferentes tipos de hábitat identificados en la laguna de evaporación, que fueron Canal (Fig. 12a), *Ruppia*-Inundado (Fig. 12b), *Ruppia*-Canal (Fig. 12c), Inundado (Fig. 12d), Inundado-*Allenrolfea* (Fig. 12e), y *Allenrolfea*-Canal (Fig. 12f); de estas trampas, 48 registraron individuos del pez cachorrillo del desierto. Por otra parte, en marzo 2011 el hábitat de *Ruppia*-Inundado obtuvo el mayor número de peces capturados (153), a diferencia de septiembre 2011 y junio 2012 donde el hábitat de mayor incidencia fue Canal con 748 y 307 individuos capturados, respectivamente. El muestreo de marzo 2012 difiere de los eventos anteriores porque el hábitat con mayor número de peces capturados fue el Inundado (387). En forma global, el hábitat que registró la mayor captura de *C. macularius* fue Canal con un total de 1092 organismos, mientras que el de menor incidencia de individuos capturados fue *Allenrolfea*-Canal con 163 (Tabla V).

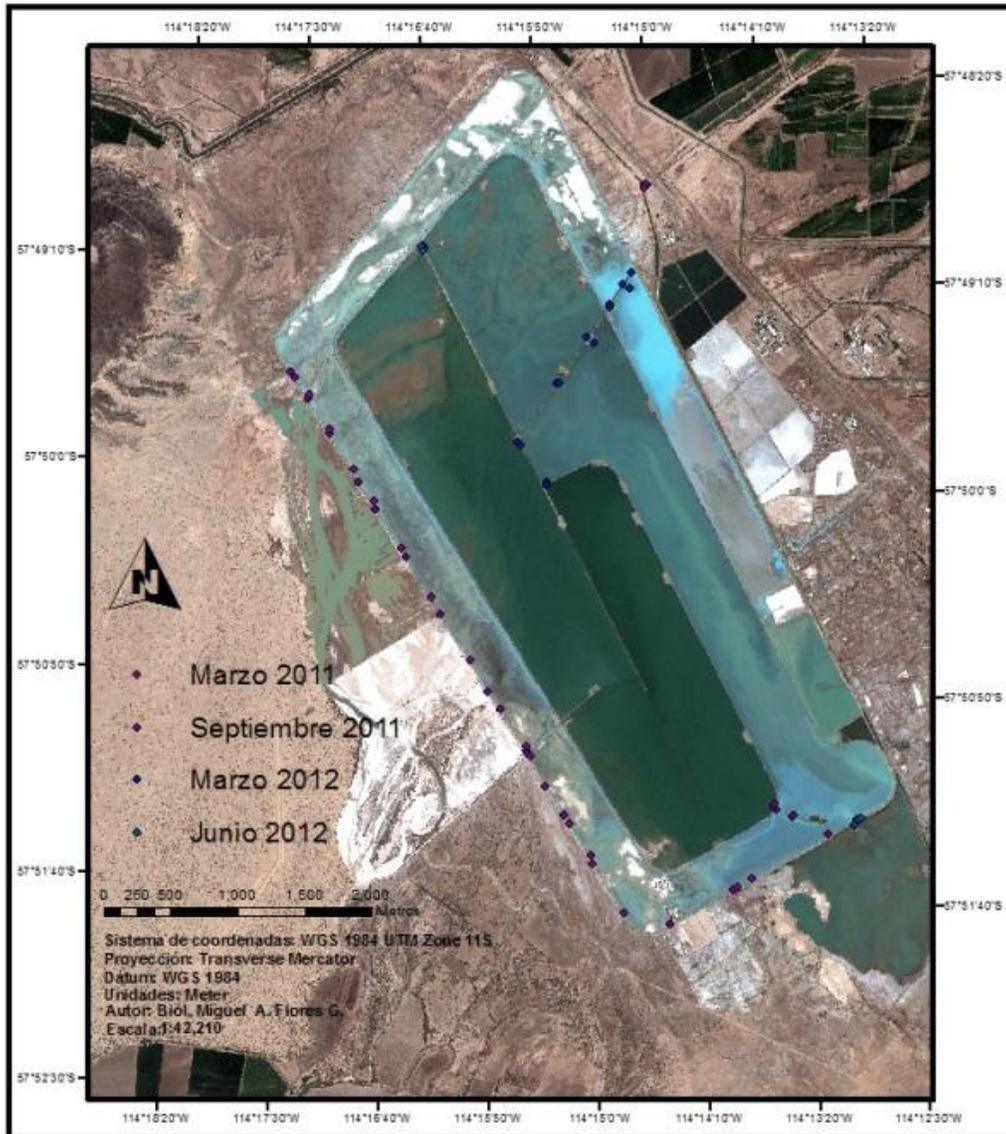


Figura 11. Sitios muestreados con diferentes tipos de hábitat en la laguna de evaporación de la geotérmica de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, durante el periodo 2011-2012.

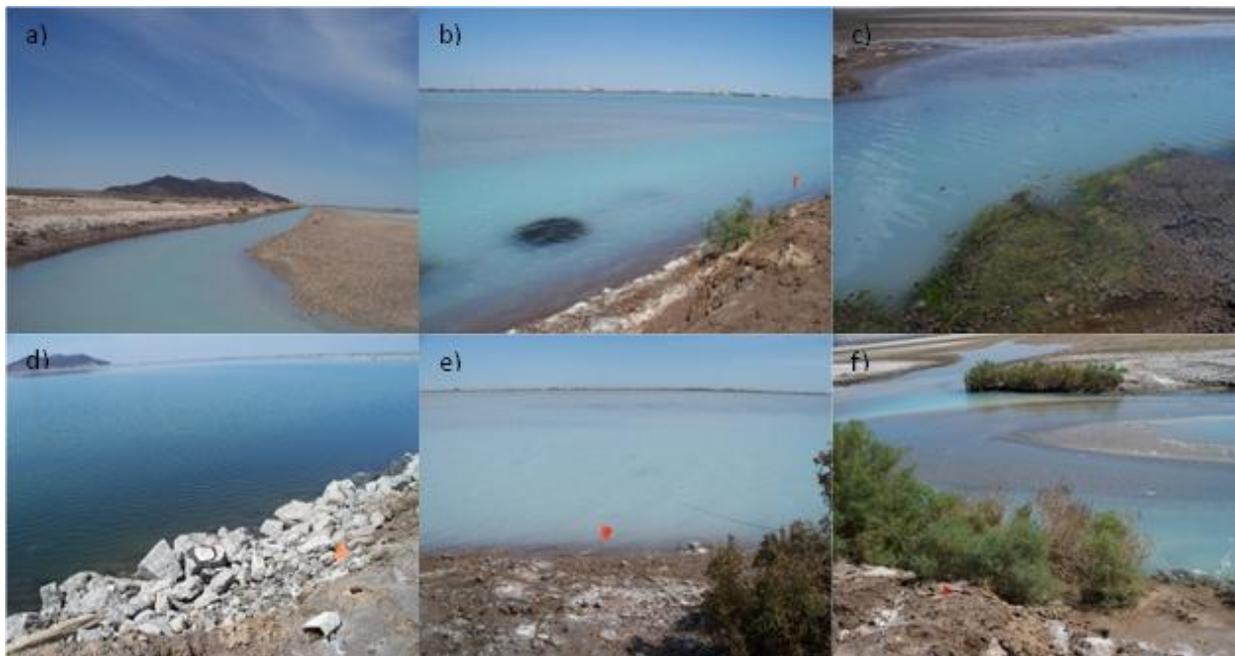


Figura 12. Tipos de hábitats identificados en la laguna de la geotérmica de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California: a) Canal, b) *Ruppia*-Inundado, c) *Ruppia*-Canal, d) Inundado, e) Inundado-*Allenrolfea*, y f) *Allenrolfea*-Canal. Fotografías por Miguel Flores.

Tabla V. Abundancia de individuos de *Cyprinodon macularius* por tipo de hábitat en la laguna de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, México.

Unidad	marzo 2011	septiembre 2011	marzo 2012	junio 2012	Total
Canal	14	748	23	307	1092
<i>Ruppia</i> -Inundado	153	60	306	230	749
<i>Ruppia</i> -Canal	0	467	0	185	652
Inundado	53	397	387	0	837
Inundado- <i>Allenrolfea</i>	32	294	0	0	326
<i>Allenrolfea</i> -Canal	36	127	0	0	163
Total	288	2093	716	722	3819

## **Distribución espacial**

A partir del ámbito de dispersión de 500 m registrado por Sutton (2000) para *Cyprinodon macularius* en Salton Sea, California, fue posible inferir su distribución espacial en la laguna de evaporación de Cerro Prieto. Dicha distribución es de tipo metapoblacional para las fechas de muestreo de marzo de 2011 y septiembre de 2011, puesto que los grupos formados están separados a distancias mayores al ámbito de dispersión de los organismos. Para el mes marzo de 2011 se obtuvieron cinco grupos poblacionales para los 17 puntos de muestreo, mientras que en el mes de septiembre de 2011 se identificaron ocho grupos a partir de los 20 puntos de muestreo. Cabe destacar que en septiembre se observó una fragmentación y disminución del tamaño de los grupos poblacionales (parches) 2 y 3 procedentes de marzo, lo que dio lugar a la generación de dos parches extras de menor tamaño (Fig. 13 a y b). Los parches 1 y 5 del mes de marzo presentaron una disminución en tamaño para septiembre; igualmente en este último mes se observó un parche de tamaño medio en la parte sureste de la laguna de evaporación. Al sobreponer las poblaciones detectadas para los meses de marzo y septiembre de 2011 se obtuvieron cuatro poblaciones, mismas que permanecen durante ambos muestreos (población fuente). De estas poblaciones, la más grande, correspondió a la población número 1, y la más pequeña, a la número 2. Por su parte, en once poblaciones no fueron constantes en su presencia durante los muestreos de marzo y septiembre de 2011, debido a que se tratan de poblaciones locales que se ubican dentro del ámbito de distribución de alguna población fuente basado en el modelo metapoblacional tipo Isla-Continente (MacArthur y Wilson, 1967). Este modelo asume que las poblaciones grandes no se extinguen a través del tiempo y exportan individuos a otros lugares o a otras poblaciones pequeñas (Figura 13 c). En el escenario del área de estudio, la población fuente 1 alimentó a las poblaciones locales 1 y 2, la población fuente 2 aportó organismos a las poblaciones locales 3-5, las poblaciones locales 6-9 dependieron de la población local 3, y finalmente las poblaciones locales 10 y 11 son soportadas por la población fuente 4.

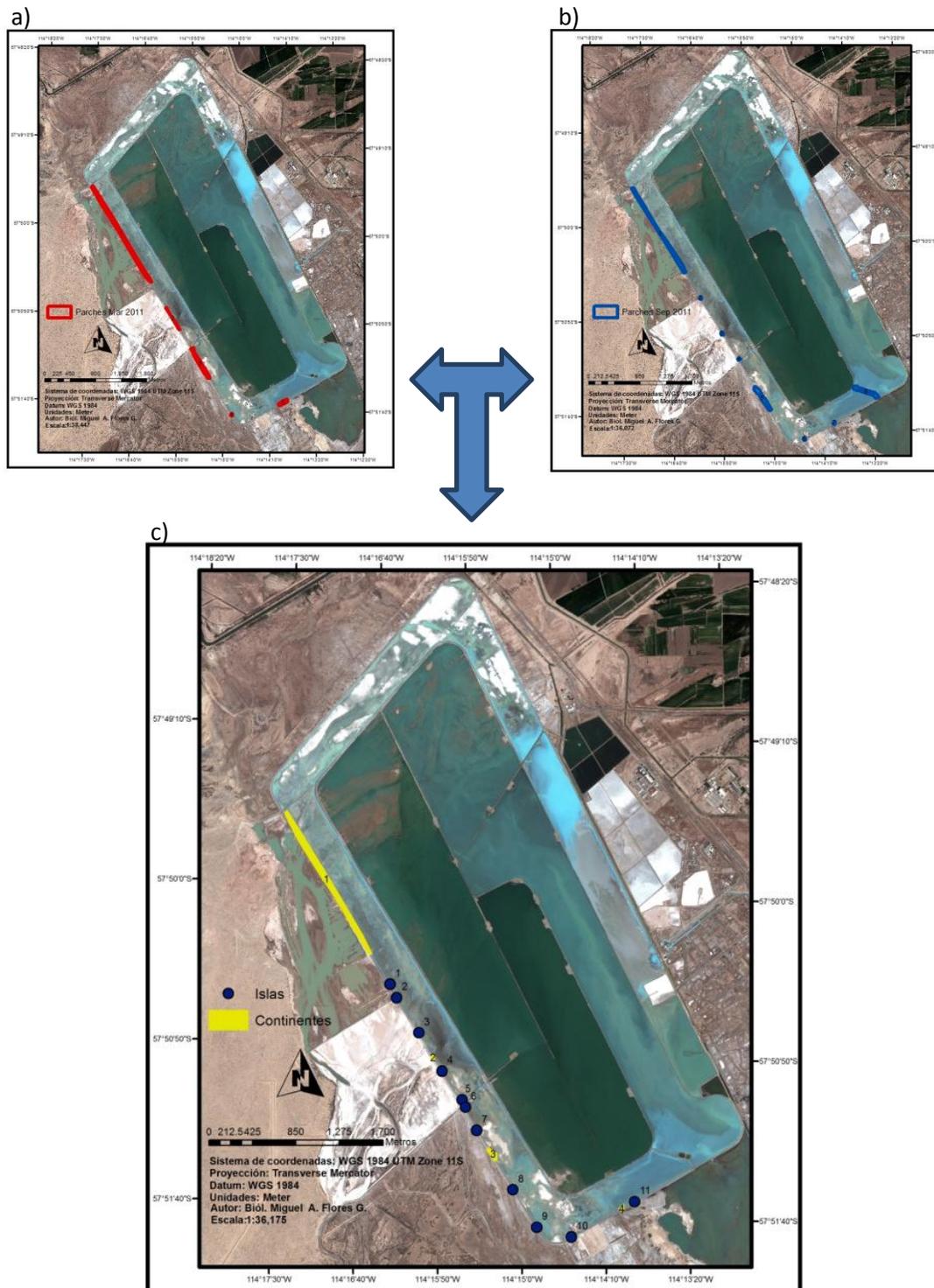


Figura 13. Poblaciones del pez cachorrillo del desierto (*Cyprinodon macularius*) en la laguna de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California: a) Marzo 2011, b) Septiembre 2011, y c) Distribución metapoblacional.

## Patrón del paisaje

En la evaluación de la fotografía satelital reciente para caracterizar el área de la laguna de evaporación de Cerro Prieto fueron identificados seis tipos de coberturas para todo el paisaje, de los cuales dos son coberturas de vegetación, una de tipo acuática que incluye al pasto marino *Ruppia maritima*, una más de tipo terrestre representado por el arbusto salado (*Allenrolfea occidentalis*) y cuatro diferentes tipos del medio físico que incluye Canal, que se forma por la acumulación de sedimento en la parte central de los vasos, Zona inundada, Zona expuesta, que es el área que queda por arriba del nivel del agua cuando se acumula demasiado sedimento, y Zona inundable que en condiciones climáticas de alta temperatura puede extenderse, como se indica en la figura 14.

Además se calculó el total de los parches de cada cobertura, siendo *Allenrolfea occidentalis* la de mayor presencia a nivel de parches, en contraste con *Ruppia maritima* que se registró en menor cantidad. Respecto a la proporción del área por clase, la cobertura que más espacio ocupó a nivel paisajístico fue la Zona inundada, y dada su extensión conformó la Matriz. Por su parte, *Ruppia maritima* ocupó un espacio muy pequeño a nivel de paisaje (Tabla VI), mientras que los Canales y la Zona inundable representaron los corredores para la interconexión entre las diferentes coberturas; para el caso de la Zona Expuesta, la cual se encuentra en segundo lugar por aportar mayor espacio paisajístico, aparenta ser un tipo de barrera para la especie de estudio.

Utilizando la relación de la abundancia poblacional del pez cachorrito para los diferentes tipos de hábitat presentes en la laguna de evaporación de Cerro Prieto, se generó la distribución potencial a partir del indicador DIPOT. Este indicador se calculó para las 50 unidades resultantes del ámbito de dispersión del pez cachorrito a través de todo el sistema lacustre, obteniéndose cuatro clasificaciones de distribución potencial (Bajo, Medio, Alto y Muy Alto); de esta clasificación, el potencial Medio fue la más dominante del paisaje con 30 unidades, seguida por el potencial Bajo con 13 unidades; otros tipos de clasificaciones para las unidades restantes, seis se clasifican en potencial Alto y solo una en potencial Muy alto ocupando el último lugar (Fig. 15).

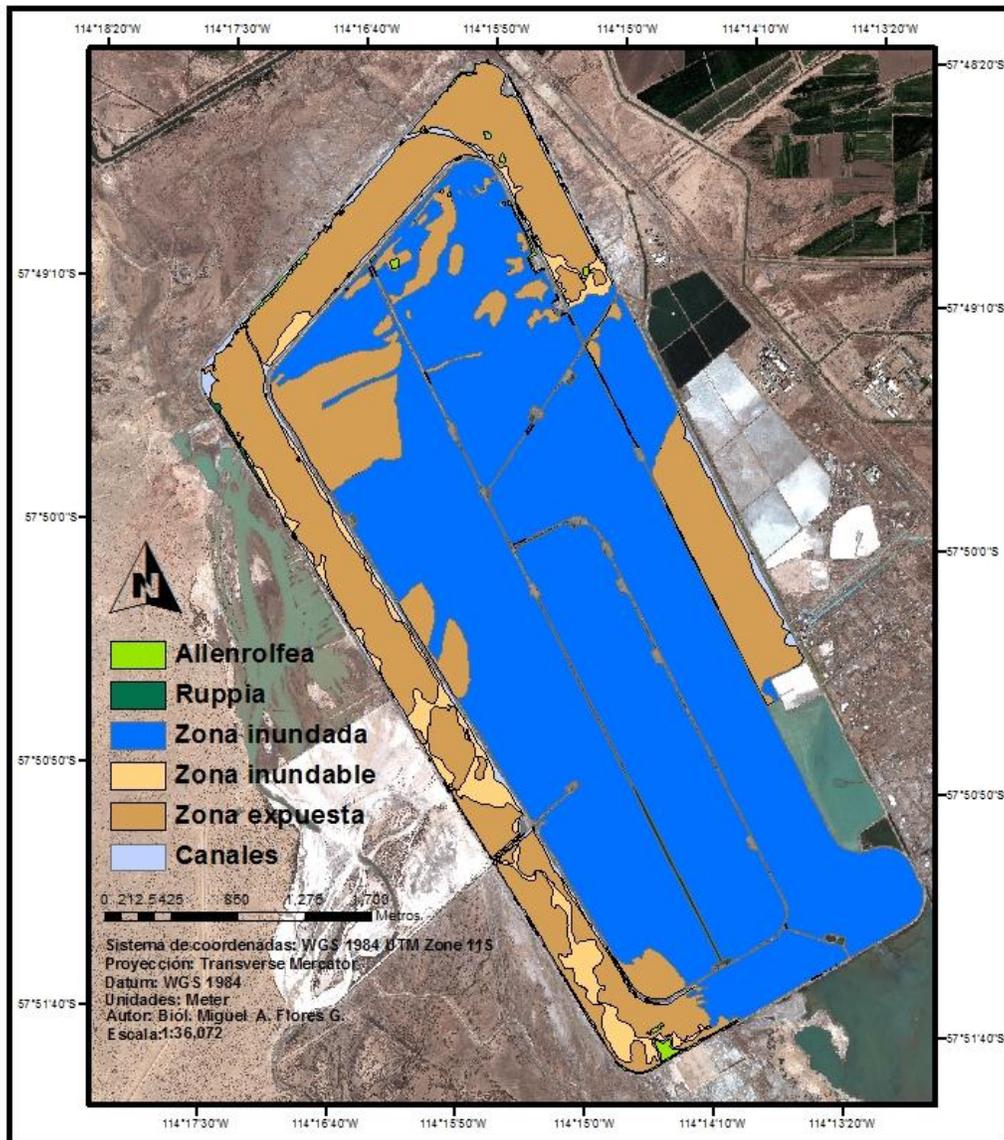


Figura 14. Caracterización del paisaje actual en la laguna de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, durante el período 2011.

Tabla VI. Número de parches de cada cobertura y la proporción de área por clase en la laguna de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California

Coberturas	Número de parches (PN)	Proporción de área por clase (CAP)
<i>Ruppia maritima</i>	9	0.050334
<i>Allenrolfea occidentalis</i>	143	0.353083
Zona Expuesta	64	17.01046
Zona inundada	37	28.34655
Zona inundable	29	2.433534
Canal	38	1.806041
Total	320	50

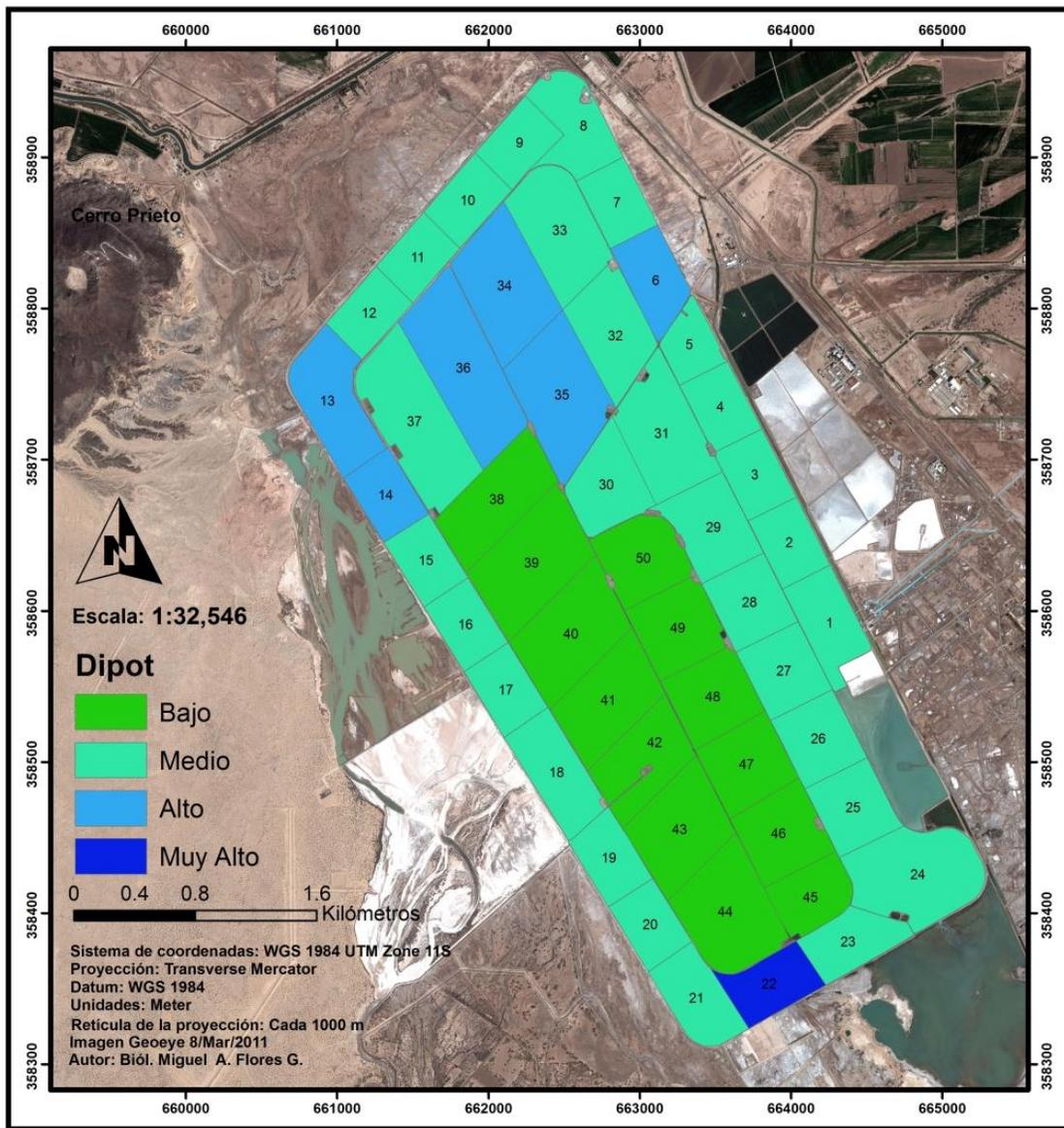


Figura 15. Distribución potencial del pez cachorrillo del desierto en la laguna de evaporación de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, durante el período 2011-2012.

La fragmentación calculada con la métrica paisajística PROX, resultó ser muy alta en las coberturas de *Allenrolfea*, *Ruppia*, Zona inundada y Canal, a diferencia de las Zonas inundables y Zonas expuestas que estuvieron menos fragmentadas. Los valores bajos de la métrica significan gran fragmentación del tipo de cobertura.

Para la obtención del grado de conexión del sistema se utilizó la métrica paisajística ENN. Aquí, los valores altos correspondieron a coberturas con menor grado de conexión. En este sentido, la cobertura más conectada correspondió a la Zona inundable seguida por la *Allenrolfea*, y finalmente con menor grado de conexión fue la Zona inundada (Tabla VII).

Tabla VII. Coberturas y resultado de las métricas PROX y ENN, en la laguna de evaporación de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, durante el periodo 2011-2012.

Coberturas	Promedio total (PROX)	Promedio total (ENN)
<i>Ruppia</i>	7.50E-06	236.42
<i>Allenrolfea</i>	1.231097	61.99403
Zona expuesta	145.423	182.0337
Zona inundada	0.035428	669.3867
Zona inundable	130.7162	50.42333
Canal	0.272133	197.61
Total	277.6779	1397.868

### Análisis de amenazas

Primeramente como resultado del análisis de amenazas para los objetos de estudio se obtuvo el coeficiente de ponderación para el criterio de asignación de valores, donde el sistema de Potencial Alto fue el que registró el mayor promedio en términos de contribución, rareza, calidad y valor como herramienta. El sistema de conservación Potencial Bajo obtuvo el menor promedio debido a la escasa contribución al sistema como grado de conservación (Tabla VIII).

Tabla VII. Asignación de valores para los diferentes sistemas de conservación en la laguna de evaporación de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, durante el periodo 2011-2012.

Sistema de conservación	Contribución	Rareza	Calidad	Valor como herramienta	Promedio
Potencial Bajo	1	4	1	1	1.75
Potencial Medio	2	4	2	2	2.5
Potencial Alto	4	4	4	2	3.5
Potencial Muy Alto	1	4	4	2	2.75

Para la laguna de evaporación de Cerro Prieto se identificaron cuatro impactos y ocho causas de los mismos. En la evaluación de los impactos, el de mayor severidad y alcance resultó ser la disminución del espejo de agua con un promedio de cuatro, seguido por la alta salinidad con dos y el resto con uno o menor a uno. Para la asignación de valores de las causas o fuentes, la acumulación por sedimentación y menor descarga de agua por parte de la geotermia resultaron con el valor más alto que es de cuatro, seguido por las descargas de agua caliente y la evaporación por altas temperaturas, con un valor de dos para cada uno; el resto de las causas tuvieron un valor de uno (Tabla IX).

**Tabla IX. Puntuaciones de los Impactos y Fuentes en la laguna de evaporación de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, durante el periodo 2011-2012.**

<b>Impacto</b>	<b>Severidad /Alcance</b>	<b>Promedio Impacto</b>	<b>Fuente</b>	<b>Actual/Futura</b>	<b>Promedio Fuente</b>
Alta salinidad	2/2	2	Acumulación por sedimentación	4/4	4
			Acumulación por evaporación causada por insolación	1/1	1
Alta temperatura	1/1	1	Descarga de agua caliente producto del proceso de la planta de geotermia	2/2	2
			Alta temperatura causada por la exposición solar	1/1	1
Disminución del espejo de agua	4/4	4	Menor descarga de agua por parte de la geotermia	4/4	4
			Evaporación por altas temperaturas causadas por el sol	2/2	2
Disminución de la cobertura vegetal	1/0.5	0.75	Roza para mantener los bordos en buen estado	1/1	1

En la asignación de valores de los impactos y sus fuentes para la laguna de evaporación de Cerro Prieto, con base en sus atributos de severidad y alcance, así como las condiciones actuales y futuras, se determinó que el impacto con mayor valor hacia el sistema es la disminución del espejo de agua, el cual alcanza una categoría de priorización de tipo Muy Alto, seguidos por la alta salinidad que es categorizado como Medio, después la disminución de la cobertura vegetal y por último la temperatura alta que se encuentran en la categoría de Bajo. Dentro de los sistemas de conservación, el potencial Medio es el que se encuentra mayormente impactado y causado principalmente por la disminución del espejo de agua, seguido está el

potencial Bajo, donde la salinidad aporta este valor de impacto; en menor grado se encuentra el potencial Alto. Donde la disminución del espejo de agua es principal contribuyente del impacto; y al final se encuentra el potencial Muy Alto, cuyos impactos son muy bajos pero existentes, donde la mayor amenaza es la disminución del espejo de agua (Tabla X).

**Tabla X. Asignación de valores para los sistemas de conservación en la laguna de evaporación de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, durante el periodo 2011-2012.**

Impactos	Potencial bajo	Objeto de conservación o Sistema			Total	Categoría
		Potencial Medio	Potencial Alto	Potencial Muy alto		
<b>Disminución del espejo de agua</b>	369.7	1470.6	422.6	66.0	2328.9	Muy Alto
<b>Alta salinidad</b>	187.7	210.6	110.3	6.2	514.8	Medio
<b>Disminución de la cobertura vegetal</b>	17.1	56.3	15.8	2.1	91.1	Bajo
<b>Alta temperatura</b>	11.4	58.1	10.5	1.4	81.4	Bajo
<b>Amenaza total del sistema</b>	<b>585.8</b>	<b>1795.6</b>	<b>559.1</b>	<b>75.6</b>	<b>3016.2</b>	

### **Propuestas de Manejo**

Para llevar a cabo y aplicar las propuestas de manejo para el pez cachorrito del desierto y sus hábitats en la laguna de Cerro Prieto, se identificaron los actores potenciales que van desde las agencias gubernamentales, el sector privado, las instituciones de la comunidad científica, las organizaciones sociales, y los habitantes del lugar. El alcance de estas propuestas irradia en el ámbito local, regional, nacional e internacional, resaltando la gran importancia para la conservación de este sistema (Tabla XI).

Tabla XI. Actores potenciales identificados para la realización de la propuesta de manejo del pez cachorrito del desierto (*Cyprinodon macularius*) en la laguna de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California.

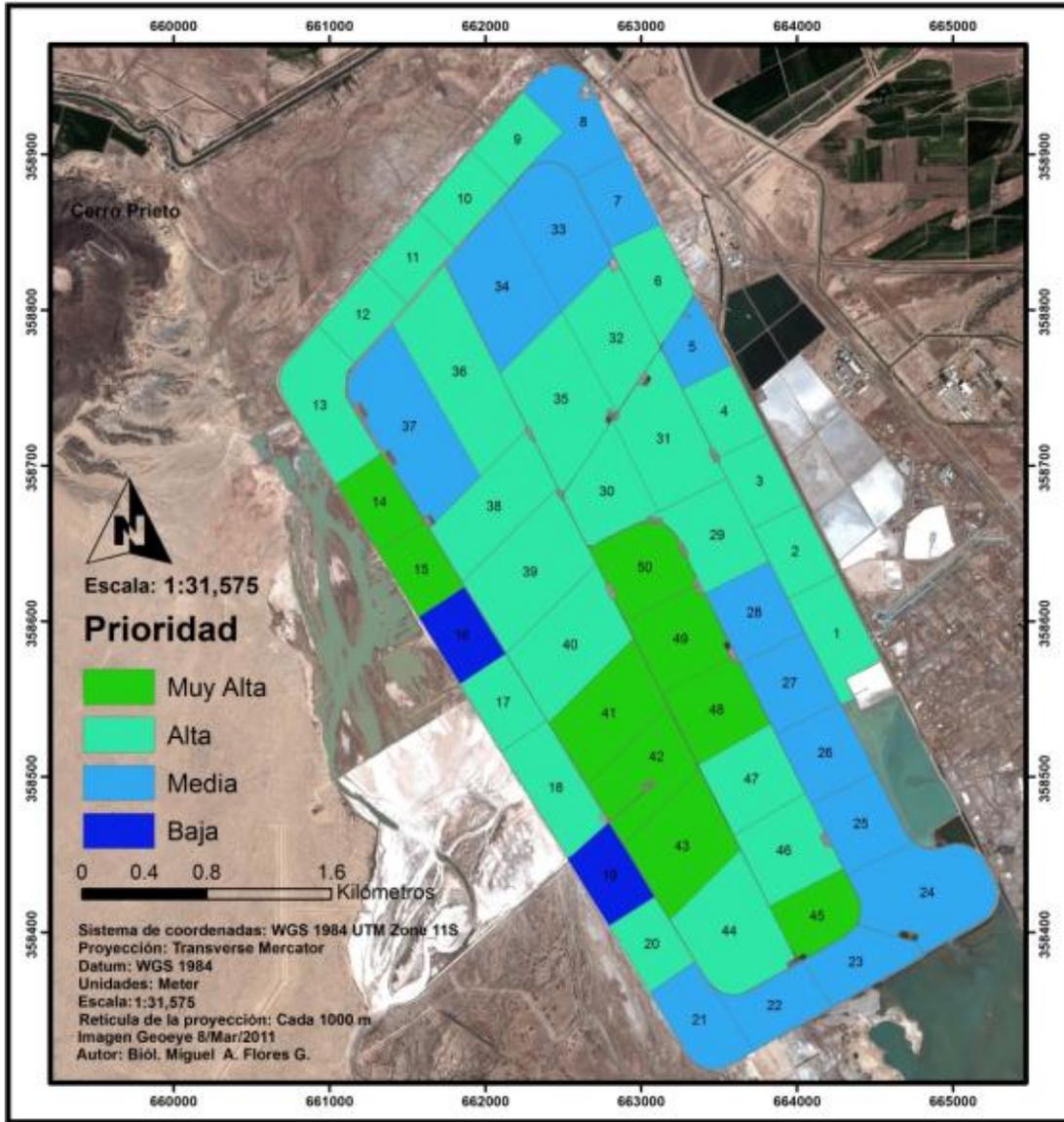
Actores	Locales	Regionales	Nacionales	Internacionales
<b>Funcionarios Públicos</b>	Director de Ecología Municipal	Delegado de Ecología del Estado	N/A	N/A
<b>Agencias de Gobierno</b>	Departamento de Ecología Municipal	Dirección de Ecología del Estado	CFE, SEMARNAT, INE, CONABIO, CONANP	CDFG, AZFGD
<b>Sector Privado</b>	Siderúrgica, Harinera, Gasera	N/A	N/A	N/A
<b>Instituciones de Asistencia</b>	N/A	N/A	N/A	N/A
<b>Comunidad científica</b>	FC, FCM	COLEF, UABC, CICESE	SIMAC, UNAM	N/A
<b>OSC' s</b>	N/A	N/A	Pronatura, Proesteros	IUCN, WWF, DFC
<b>Vecinos</b>	Ejidatarios, Vecindados	N/A	N/A	Valle Imperial

CFE (Comisión Nacional de Electricidad), SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), INE (Instituto Nacional de Ecología), CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad), CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas), FC (Facultad de Ciencias), FCM (Facultad de Ciencias Marinas), COLEF (Colegio de la Frontera Norte), UABC (Universidad autónoma de Baja California), CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada), SIMAC (Sociedad Ictiológica Mexicana A.C.), UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México), CDFG (California Department of Fish and Game), AZFGD (Arizona Game and Fish Department), IUCN (International Union for Conservation of Nature), WWF (World Wildlife Fund) y DFC (Desert Fishes Council).

En la figura 16 se muestra el índice de EstPre que dio como resultado cuatro categorías a partir de los indicadores de presión y estado. Lo anterior significa que a un mayor valor del EstPre existe un mejor estado y una menor presión, indicando así la prioridad para la aplicación de las acciones para disminuir los impactos en cada unidad evaluada. Nueve unidades se encuentran en la clasificación de prioridad Muy Alta, después están las de prioridad Alta que son la mayor parte del sistema con 25 unidades, seguidas por 14 unidades clasificadas en prioridad Media, y solo dos como prioridad Baja (Tabla XII).

Tabla XIII. Unidades correspondientes a la clasificación de prioridad dada por el índice EstPre, durante el periodo 2011-2012 en la laguna de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California.

Prioridad	Unidades
Muy Alta	14, 15, 41, 42, 43, 45, 48, 49 y 50
Alta	1, 2, 3, 4, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 17, 18, 20, 29, 30, 31, 32, 35, 36, 38, 39, 40, 44, 46 y 47
Media	5, 7, 8, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 33, 34 y 37
Baja	16 y 19



Para complementar las propuestas de manejo a nivel sistema se identificaron con el análisis FODA cinco fortalezas, tres oportunidades, dos debilidades y cuatro amenazas, las cuales se colocaron en una matriz para generar las recomendaciones (Tabla XIII).

Tabla XIII. Análisis FODA para la laguna de evaporación de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California.

	<b>Fortalezas</b>	<b>Oportunidades</b>	<b>Debilidades</b>	<b>Amenazas</b>
1	Área cerrada al público	Educación ambiental	Dependiente de las descargas	Disminución de la descarga de agua
2	Espejo de agua todo el tiempo	Investigación científica	Mala imagen	Eliminación de la laguna de evaporación
3	No hay especies exóticas	Reconocimiento social		Introducción de especies exóticas
4	Mejor población del <i>Cyprinodon macularius</i> en México			Planta geotérmica deje de funcionar
5	Área de anidación, alimentación y descanso de aves migratorias			

A continuación se enlistan las propuestas de manejo a nivel unidad y sistema para los impactos con las unidades correspondientes a cada uno, los proyectos para resolverlos o minimizarlos, las actividades a realizar, los actores potenciales con los que la Comisión Federal de Electricidad (CFE) puede trabajar en conjunto para beneficio de ambos, y la priorización con la que se deben tratar los impactos para la protección del pez cachorrito del desierto (Tablas XIV y XV).

Tabla XIV. Propuestas de manejo para los impactos en la laguna de evaporación de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, durante el periodo 2011-2012.

Impacto	Proyecto	Actividad	Responsable(s)	Priorización	Unidades a aplicar
Disminución del espejo de agua por descarga	Regulación de descargas	Investigar la cantidad de agua que debe descargarse para no disminuir el espejo y mantener constante el flujo	C.F.E. en conjunto con la UABC	Muy Alta	Todas
Alta salinidad por sedimentación	Desazolve	Desazolver los vasos con mayor azolve por temporadas	C.F.E.	Media	29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49 y 50
Alta temperatura por descarga	Regulación de descargas	Monitorear las descargas y evitar que excedan de 45°C	C.F.E. en conjunto con la UABC	Baja	1, 2, y 3
Alta salinidad por evaporación	Reforestación	Reforestar con arbusto salado ( <i>Allenrolfea occidentalis</i> ) las orillas de los bordos para la absorción de sales	C.F.E. en conjunto con la UABC, Dirección de Ecología del Estado, Director de Ecología Municipal.	Baja	6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21 y 22
Alta temperatura por el sol		Reforestar con plantas nativas (mezquite, <i>Prosopis</i> sp.) que den sombra en las orillas del bordo evitando el pino salado ( <i>Tamarix</i> sp.)	C.F.E. en conjunto con la UABC, Dirección de Ecología del Estado, Director de Ecología Municipal.	Baja	1, 2, 3 y 4
Disminución del espejo de agua por evaporación		Reforestar con plantas nativas (mezquite, <i>Prosopis</i> sp.) que den sombra en las orillas del bordo evitando el pino salado ( <i>Tamarix</i> sp.)	C.F.E. en conjunto con la UABC, Dirección de Ecología del Estado, Director de Ecología Municipal.	Baja	6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21 y 22
Disminución de la cobertura vegetal	Mejora de Mantenimiento	Realizar mantenimiento en los bordos quitando el exceso de vegetación sin quitar la planta completa en el lado interno del bordo.	C.F.E.	Baja	Todas

Tabla XV. Propuestas de manejo a nivel Sistema en la laguna de evaporación de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, durante el periodo 2011-2012.

Debilidades, oportunidades o amenazas y componentes asociados del análisis FODA	Proyecto	Actividad	Responsable(s)
D2,F1,F4,F5,O1,O2,A2	Nueva Imagen	Talleres para crear otra imagen al público mostrando la importancia del espejo de agua de la laguna de evaporación para albergar especies tan importantes, incluyendo visitas guiadas para la educación ambiental y la investigación de la biodiversidad.	C.F.E. en conjunto con la UABC, WWF, DFC, Pronatura, Proesteros, SIMAC, UNAM, CDFG, AZFGD.
A4, F2,F4,F5,O1,O2	Restauración	Llevar a cabo el diseño de un programa de restauración para la Laguna de evaporación tomando en cuenta al pez cachorrito del desierto, a las aves endémicas y migratorias, a la vegetación de la región, las áreas específicas para cada especie y el espejo de agua necesario para que el sistema siga funcionando.	C.F.E. en conjunto con la SEMARNAT, CONANP, UABC, WWF, DFC, Pronatura, Proesteros, SIMAC, UNAM, CDFG, AZFGD.
A3,F4,O1,O2	Pez cachorrito del desierto	Investigación y monitoreo de la avifauna y del pez cachorrito del desierto ( <i>Cyprinodon macularius</i> ), para demostrar como las características que contiene este sistema lacustre son importantes para el éxito poblacional. Extraer peces y aclimatarlos para utilizarlos como organismos para reintroducción en hábitats donde fue extirpado.	C.F.E. en conjunto con la UABC, WWF, DFC, SIMAC, CDFG, AZFGD.
D1, F2, O2, A1	Regulación de descargas	Monitorear las descargas y evitar que éstas no excedan de 45°C; investigar la cantidad de agua que debe descargarse para no disminuir el espejo y mantener constante el flujo.	C.F.E. en conjunto con la UABC y CISECE

## Discusión

En el presente estudio sobre la población del pez cachorrito del desierto (*C. macularius*) en la laguna del Campo Geotérmico de Cerro Prieto (LCGCP), en el Valle de Mexicali, se encontró que la abundancia (CPUE) de este pez está correlacionado significativamente con la temperatura y la salinidad de este cuerpo lacustre. Este resultado es concordante con lo registrado previamente por Varela-Romero et al. (1999, 2002) para las poblaciones de esta especie en las localidades mexicanas del Bajo Río Colorado, incluyendo la LCGCP, así como con Martin y Saiki (2005) para el Salton Sea, California (EE.UU.). Los resultados aquí generados sobre la abundancia de este pez en los diferentes niveles de temperatura y salinidad en los sitios de muestreo de LCGCP, permiten indicar que una combinación de alta salinidad (>46 ppt) y alta temperatura (>44°C) actúan como una barrera fisicoquímica para la distribución del *C. macularius* en la LCGCP. Esto ocurre aun cuando las condiciones del área de estudio son generadas por actividades antropogénicas.

Dentro de la abundancia poblacional del pez cachorrito del desierto en la LCGCP existen variaciones en cada evento de recolecta, con valores de CPUE total (individuos/trampa/hora) que oscilan entre 0.96 y 4.03, siendo este último de septiembre 2011 sin diferencia significativa con aquél de junio 2012 de 4.01. El intervalo de CPUE registrado en el presente estudio se mantienen iguales con los reportados previamente por Varela-Romero et al. (1999) y Ruiz-Campos et al. (2010) para esta localidad, donde los intervalos de variación del CPUE total se encuentran entre 0.08 y 4.01 individuos/trampa/hora, además de realizar sus muestreos en diferentes meses y estaciones del año.

Por otra parte, los tipos de hábitat que se identificaron en la LCGCP presentan diferencias en la CPUE del pez cachorrito del desierto, ya que unos contienen una mayor cobertura (*Ruppia maritima*) que sirve como refugio y proveen una mayor disponibilidad de alimento, en cambio otros son utilizados para reproducción y desove (Sutton, 2002 y Martin et al., 2005).

La proporción de sexos combinados en la LCGCP fue favorable para las hembras durante el periodo 2011-2012, en un proporción de 1: 0.46 (es decir 0.47 machos por cada hembra), lo

que no concuerda con lo encontrado por Ruiz-Campos et al. (2010) y Varela et al. (1999), donde dichos autores encontraron que la proporción de sexos no fue significativamente diferente (un macho por cada hembra). Sin embargo, a nivel estacional el favoritismo hacia las hembras fue similar con lo reportado por dichos autores, donde esta variación de sexos fue originada por la época reproductiva y por el movimiento local de individuos (USFWS, 2010).

La estructura poblacional por tallas (longitud total) de los sexos combinados durante el periodo 2010- 2011 fue conformada por tres clases de talla, las cuales mantuvieron el mismo comportamiento en machos, hembras y durante todo el muestreo. El número de clases de talla fueron similares con los obtenidos en los periodos 1996-1997 (Varela-Romero et al., 1999) y 2005-2006 (Ruiz-Campos et al., 2010, 2012), aunque difieren en la abundancia de cada uno de ellas, ya que los muestreos del período 2010-2011 fueron efectuados en diferentes épocas del año en los cuales hay dinámica en el número de individuos, empero la estructura poblacional se mantuvo constante.

Utilizando el ámbito de dispersión de 500 metros descrita por Sutton (2002) para *C. macularius* en Salton Sea (California) y su extrapolación a LCGCP, la distribución potencial fue diferente en los muestreos de marzo y septiembre de 2011, donde en total se encontraron 13 grupos poblacionales, de los cuales cinco correspondieron a marzo y ocho a septiembre. Lo anterior es debido a que durante marzo las condiciones climatológicas favorecieron la permanencia de un espejo de agua mayor, por lo que las poblaciones separadas tendieron a unirse y ser homogéneamente más abundantes, lo que conlleva a que el número de poblaciones o grupos disminuyera. Por otro lado, en septiembre el espejo de agua disminuyó por la prevalencia de los procesos de evaporación característicos del verano, provocando así que la abundancia poblacional del pez cachorrito disminuyera, por lo que las poblaciones se separaron e incrementaron en número. En coincidencia con lo dicho por Phillips et al. (2004) y Kravchenko et al. (2008), quienes consideran que las condiciones físicas y biológicas favorecen la dinámica estacional en la abundancia de esta especie.

De las cuatro poblaciones fuente encontradas en la LCGCP, dos de ellas pertenecen a la parte noroeste del vaso tres, mientras que las otras dos a la parte suroeste del vaso cuatro; estas

poblaciones fuente son las que aportan individuos hacia otros parches o colonizan nuevos, de acuerdo al modelo descrito por López et al. (2000), donde existen poblaciones que son persistentes y se encuentran rodeadas por poblaciones más pequeñas que tienden a la extinción. En el patrón del paisaje actual de la laguna de evaporación de la geotérmica de Cerro Prieto, el mosaico se compone de los parches de *Ruppia maritima* y de *Allenrolfea occidentalis*, Zona expuesta, Zona inundable, Zona inundada y Canales; todas ellas representando unidades que pueden ser diferenciadas. Por su parte, la matriz corresponde a la Zona inundada, ya que de acuerdo a la métrica CAP es la más extensa y de mayor cobertura espacial, mientras que los Canales y la Zona inundable son consideradas los corredores que vinculan entre sí a las demás coberturas o parches. Dichos parches son de gran importancia debido a que protegen las conexiones, sustentan poblaciones viables, dan refugio y cobertura de escape a las poblaciones que se encuentran dentro del ámbito de dispersión (Vila et al. 2006; Forman, 1995).

La evaluación de la conectividad y la fragmentación dentro de los diferentes tipos de cobertura permitió identificar los procesos que permiten la presencia del *C. macularius* en la LCGCP. Los hábitats de Canal y Zona inundada son conectores para facilitar el desplazamiento de individuos de un lugar a otro en busca de comida, refugio y nuevos lugares para colonizar o reproducirse. La conectividad es un atributo esencial para la conservación de una especie ya que mantiene viable la dinámica metapoblacional, reduce el tamaño de las poblaciones para mantenerlas genéticamente viables y permite la migración a otros fragmentos incrementando la probabilidad de sobrevivencia (Acosta et al., 2003). Este escenario ocurre también en la LCGCP, dado que en los meses cuando las áreas inundables están cubiertas de agua permiten la conexión de una población a otra, intercambio organismos y colonizando nuevo sitios, mientras que en los meses de mayor evaporación se reducen el espejo lacustre y desaparecen los corredores, por tanto las poblaciones comienzan a aislarse y algunas comienzan a desaparecer.

Por otro lado, la métrica ENN mide el grado de conexión del sistema por lo que el resultado es espacial o estructural y no biológica o funcional, es por eso que aunque la Zona inundada tenga un grado de conexión estructural bajo, el grado de conexión funcional es alto debido a la relación que hay entre la abundancia y este tipo de cobertura, además de que el pez puede

pasar de un parche a otro que se encuentra en el ámbito de dispersión aunque no esté contiguo, ya que no existen barreras físicas que impidan la dinámica poblacional (Kindlmann et al., 2008).

En lo que respecta a la fragmentación, ésta es muy alta en la cobertura de *Allenrolfea* que es la que más parches tiene y ocupa una porción de área muy baja; sin embargo tiene una alta conectividad que permite a las poblaciones mantener una dinámica viable; este mismo efecto pasa con *Ruppia* que también ocupa una porción muy baja del área a pesar de que tiene el mayor número de parches, esto nos indica que el tamaño del parche es muy pequeño y el riesgo de extinción de las poblaciones que ocupan estos tipos de cobertura es mayor (Bennet, 2003).

Con lo que respecta a los valores de impacto, para la ponderación de los diferentes sistemas de conservación, el potencial Alto resultó con más valor debido a que el atributo de contribución fue de cuatro, lo que significa que si el sistema de la LCGCP desapareciera o fuera seriamente dañado la población del pez cachorrito se vería seriamente amenazada o incluso podría ocurrir una extinción local dañando la cadena alimenticia en el sistema de la laguna. Cabe mencionar que el pez cachorrito del desierto forma parte de la dieta de la mayoría de las aves acuáticas (e.g., Podicipedidae, Phalacrocoracidae, Ardeidae, Lariidae, etc.) que se encuentran en la laguna de evaporación de Cerro Prieto.

Para el criterio de rareza se ponderó con la puntuación mayor por la presencia del pez cachorrito del desierto que es una especie en peligro de extinción (NOM-059, 2010), al igual que la rareza, la calidad se ponderó de esa manera por ser un lugar con mejor calidad, ya que mantiene las condiciones necesarias para el desarrollo de las poblaciones; y por último el valor como herramienta está basado en que es un sistema con valor potencial educativo y científico, ya que aún no se ha explotado esa área. Otra característica importante que soporta la categoría potencial Alto es que este sistema tiene las poblaciones fuente que son esenciales para sustentar la dinámica actual y tener más poblaciones, tal y como lo expresa Akzakaya et al. (2006) “...todo efecto de persistencia metapoblacional tipo isla-continente depende de la población fuente...”.

Debido a que la laguna de evaporación de Cerro Prieto es un sistema transformado por la CFE que brinda un espejo de agua continuo, además de servir como un refugio para el pez cachorrito del desierto, brindándole hábitats aptos para su desarrollo, este ecosistema se vuelve *per se* necesario (Barragán, 2001), así que el sistema deberá de protegerse contra amenazas que afectan el lugar, tal como aquellos identificados en el modelo de amenazas y FODA, coincidiendo con Alvarado et al. (2001) quienes recomiendan las cortinas rompe vientos en los campos de cultivo como necesarias para las aves y plantas leñosas.

De los impactos identificados en el área de estudio, el de mayor amenaza es la disminución del espejo de agua, que actualmente depende en su totalidad de la aportación de la planta de geotermia, ya que en el pasado el agua provenía de géiseres, manantiales y algunas descargas provenientes de los campos agrícolas de la parte este del Valle de Mexicali (Alonso, 1964).

El índice de EstPre nos indica que la mayor parte del sistema de la LCGCP se encuentra en una calidad ecológica media (más del 50% del área total), ya que los impactos que se distribuyen alrededor de la laguna no lo dañan de manera severa a excepción de la concentración de sales (que amenaza con consumir más área por la acumulación) y la disminución de la descarga de agua (que es un riesgo para todo el sistema), y que los hábitats más aptos para el pez cachorrito no están impactados; por tanto, el índice utilizado ofrece una visión amplia de cómo se encuentra el sistema y de las amenazas que los están abordando, además de priorizar las unidades que requieren una pronta atención para la disminución de los impactos; de igual manera, Jackson et al. (2000) indicaron que los índices elegidos deberán de proveer información relevante que concierne a las condiciones ecológicas actuales y, que puede asegurar y demostrar las medidas de los recursos evaluados.

Se elaboró una tabla de actores potenciales para llevar a cabo las propuestas de manejo de la LCGCP en conjunto con la Comisión Federal de Electricidad, en la cual se incluyen instituciones gubernamentales y no gubernamentales, instituciones académicas, organizaciones sociales y gente que vive en los alrededores del campo geotérmico, para que se lleve a cabo la integración en los proyectos planteados y resulten beneficiados todos aquellos que estén interesado en la protección de la laguna de evaporación que alberga gran número de aves migratorias y de la

región (De León-Girón, 2007), así como al pez cachorrito del desierto en peligro de extinción (Varela-Romero et al., 1999, 2002; Ruiz-Campos et al., 2012).

Finalmente, el método FODA permitió identificar las limitantes y oportunidades que se presentan para la conservación de la LCGCP, en donde se debe trabajar para modificar la percepción negativa que actualmente tienen los residentes del valle de Mexicali del lugar, para lo que la presencia del pez endémico y en peligro de extinción puede abrir una ventana de oportunidad para mejorar la imagen pública de la CFE. Es por esto que se debe de profundizar en el conocimiento de los componentes sociales e informar a los actores potenciales sobre la importancia que tiene este ecosistema transformado para la conservación de la especie, con el propósito de mejorar la relación con los vecinos para llevar a cabo los proyectos de manejo y darles seguimiento. En concordancia con los criterios de Castillo (2003), Leech et al. (2009), Bonnell (2009), Lackey (1998) y Grumbine(1994), el manejo de ecosistemas es un proceso por medio del cual se describen condiciones ecológicas que se requieren mantener para asegurar un ecosistema sano, así como las acciones para lograrlo, es por eso que durante el proceso es importante la interacción y comunicación entre los participantes del proyecto, las instituciones y la sociedad, para mejorar las propuestas de acuerdo a los requerimientos necesarios manteniendo la integridad y calidad ambiental.

## Conclusiones

1. La población del pez cachorrillo del desierto *C. macularius* en la laguna de Evaporación de Cerro Prieto (LECP), presentó una variación estacional en su abundancia y estructura poblacional.
2. La población del pez cachorrillo del desierto (*C. macularius*) en la laguna de evaporación de Cerro Prieto exhibió una proporción sexual favorable a las hembras (1:0.45) a lo largo del periodo de estudio.
3. De los cinco tipos de hábitat identificados en el área de estudio, el de tipo canal fue el que registró la mayor abundancia, seguido por Inundado, *Ruppia*-Inundado, *Ruppia*-Canal, Inundado-*Allenrolfea* y *Allenrolfea*-Canal.
4. La presencia de *C. macularius* en la laguna de evaporación de Cerro Prieto se manifiesta en una distribución metapoblacional de tipo Isla-Continente.
5. El mosaico paisajístico en el área de distribución del pez cachorrillo del desierto en la LECP se compone de los parches de *Ruppia maritima* y de *Allenrolfea occidentalis*, Zona expuesta, Zona inundable, Zona inundada y Canales; donde los corredores son los Canales y la Zona inundable, y la matriz es la Zona inundada.
6. Los procesos evaluados que explican la distribución tipo metapoblacional de *C. macularius* en la LECP son: una fragmentación espacial alta y un grado de conexión entre parches bajo. Sin embargo, debido a la distribución y abundancia uniforme del pez cachorrillo del desierto en la laguna de evaporación es posible suponer un alto grado de conexión funcional para esta especie.
7. El grupo de potencial “Alto” en la clasificación del indicador DIPOT presenta el valor mayor por sus atributos como sistema de conservación.
8. El impacto de mayor amenaza para la laguna de evaporación de Cerro Prieto es la disminución del espejo de agua, la cual depende de las descargas de la planta geotérmica.

9. El índice estado-presión (EstPre) reveló que la laguna de evaporación se encuentra en un ambiente de calidad media para el desarrollo del pez cachorrillo del desierto (*C. macularius*).

10. Para llevar a cabo las propuestas de manejo el actor principal (CFE) debe de realizar las acciones en conjunto con los actores potenciales.

## Literatura citada

- Acosta, J. G., Simonetti, A., Bustamante, O., & Dunstone, N. (2003). Metapopulation approach to assess survival of *Oncifelis guigna* in fragmented forest of central Chile: A theoretical model. *Mastozoología Neotropical*, 10(2), 217-229.
- Arizona Game and Fish Department [AGFD]. (2012). List of the Nongame and Endangered Wildlife. Arizona Game and Fish Department Publication. Phoenix. 101.
- Ailstock, S., & Deborah, S. (2004). Restoration Potential of *Ruppia maritima* and *Potamogeton perfoliatus* by Seed in the Mid-Chesapeake Bay. *US Army Corps of Engineers*. 4(2), 1-8.
- Akzakaya, H. R., Mills, G., & Doncaster, C. P. (2006). The role of metapopulations in conservation. *Topics in Conservation Biology*, 4(5), 64-84.
- Alonso, E. H. (1964). La zona geotérmica de Cerro Prieto. Informe de exploración hasta 1964. *Comisión Federal de Electricidad C.F.E.*, 17-47.
- Alvarado, V., Antón, E., Harvey, C. A., & Martínez, R. (2001). Aves y plantas leñosas en cortinas rompe vientos en León, Nicaragua. *Informe de investigación*, Cuencas y Sistemas Agroforestales. 1-7.
- Andrade, M. H., Morales, G., & Hernández, A. (1999). Guía de análisis de impactos y sus fuentes en áreas naturales. *The Nature Conservancy*. 45
- Barragán, K. B. (2001). Áreas Protegidas. *Boletín Geas*. 2(2), 9-18.
- Bennet, A. F. (2003). Linkages in the Landscape The Role of Corridors and Connectivity in Wildlife Conservation. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK. 262.
- Bissonette, J. A., & Storch, I. (2003). Landscape ecology and resource management. Island Press, Washington, D.C., USA. *Conservation Ecology* 7(2): 3.
- Black, G. F. (1980). Status of the Desert Pupfish, *Cyprinodon macularius* (Baird and Girard), in California. *Inland Fisheries*, 80(1), 35.
- Blake, B., Thompson, B., Polk, W., Johnson, J., Duckworth, B., & Stan, B. (2005). S.W.O.T. ANALYSIS Identifying Your Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats. *Texas Cooperative Extension*, 1-18.
- Bonnell, J. (2009). Ecosystems and Ecosystem Management. *Agriculture and Natural Resources*, 6(09), 1-4.

- Burel, F., & Baudry, J. (2003). *Landscape Ecology : Concepts, Methods, and Applications*. Enfield, N.H.: Science Publishers, Inc., 394.
- Comisión Federal de Electricidad [CFE ]. (2010). Perforación Exploratoria en la Zona Geotérmica Nuevo León, B.C. *Informe preventivo*, 81.
- Camacho, J. M. (2009). Zonas de alteración hidrotermal y condiciones actuales del yacimiento: un enfoque para determinar zonas productoras al oriente del campo geotérmico de Cerro Prieto. *Geotermia*, 22(2), 37-88.
- Castillo, A. (2003). Comunicación para el manejo de ecosistemas. *Tópicos en Educación Ambiental*, 3(9), 58-71.
- California Department of Fish and Game [CDFG]. (2011). State & federally listed endangered & threatened animals of California. The Natural Resources Agency. California Natural Diversity Database. 13.
- Collinge, S. K., & Forman, R. T. (2009). *Ecology of Fragmented Landscapes*. Baltimore, MD, USA. Johns Hopkins University Press, 358.
- Dale, V. H., & Beyerler, S. C. (2001). Challenges in the development and use of ecological indicators. *Ecological Indicators*, 1, 3-10.
- De León-Girón, G. (2007). Determinación de la dinámica temporal de la comunidad aviar en la laguna de evaporación del Campo Geotérmico "Cerro Prieto", Mexicali, Baja California, México y su evaluación ecológica para las especies migratorias y residentes. Tesis Maestría en Ciencias, Universidad Autónoma de Baja California.
- Diario Oficial [DOF]. (1994). NOM-059-ECOL-1994, 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 de la Federación. México, D.F. 78.
- Dumas, A. Á. (2009). Áreas para exploración en los alrededores del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC. *Geotermia*, 22(2), 2-9.
- Dumas, A. Á. (2010). Situación actual y alternativas de exploración y explotación en el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC. *Geotermia*, 23(2), 33-40.
- Esselman, P. C., Infante, D. M., Wang, L., Wu, D., Cooper, A. R., & Taylor, W. W. (2011). An Index of Cumulative Disturbance to River Fish Habitats of the Conterminous United States from Landscape Anthropogenic Activities. *Ecological Restoration*, 29(1-2), 133-151.

- Estades, C. F. (1998). Especie non grata: efectos ecológicos de las especies exóticas. *Ciencia al día*, 1(2), 1-12.
- Fajardo, D., Gonzalez, R. J., Neira, L., Chará, J., & Murgueitio, E. (2006). Influencia de sistemas silvopastoriles en la diversidad de aves en la cuenca del río La Vieja, Colombia. *Recursos Naturales y Ambiente*, 58, 9-16.
- Faush, K., Torgersen, C., Baxter, C., & Li, H. (Junio de 2002). Landscapes to rivescapes: Bridging the gap between research and conservation of stream fishes. *BioScience*, 52(6), 483-498.
- Follett, W. I. (1960). The Fresh-water Fishes—Their Origins and Affinities. *Systematic Zoology*, 9(3-4), 212-232.
- Forman, R. T. (1995). Some general principles of landscape and regional ecology. *Landscape Ecology*, 10(3), 133-142.
- Franklin, A. B., Noon, B. R., & George, L. T. (2002). What is habitat Fragmentation?. *Studies in Avian Biology*, 25(1), 20-29.
- Freemark, K. E., Probst, J. R., Dunning, J. B., & Hej, S. J. (1993). Adding a Landscape Ecology Perspective to Conservation and Management Planning. *Environmental Research*, 346-352.
- Grumbine, E. R. (Marzo de 1994). What Is Ecosystem Management?. *Conservation Biology*, 8(1), 27-38.
- Gul, B., Weber, D. J., & Ajmal Khan, M. (2001). Growth, ionic and osmotic relations of an *Allenrolfea occidentalis* population in an inland salt playa of the Great Basin Desert. *Journal of Arid Environments*, 48, 445-460.
- Hanski, I. (2003). Metapopulation Ecology. Great Britain. *Oxford series in ecology and evolution*, 266.
- Hanski, I. A., & Gaggiotti, O. E. (2004). Ecology, Genetics and Evolution of Metapopulations. Burlington, MA, USA. *Academic Press*, 717.
- Hendrickson, D. A., & Varela-Romero, A. (1989). Conservation status of desert pupfish, *Cyprinodon macularius* in Mexico and Arizona. *Copeia 1989*, 478-483.
- Hubert, W. A.; Pope, K. L. y Dettmers, J. M. (2012). Passive capture techniques. Fisheries techniques, 3rd edition. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland. 223-265.

- International Union for Conservation of Nature [IUCN]. (1990). The IUCN Red List of Threatened Animals. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK. 228.
- Jackson, L. E., Kurtz, J. C., & Fisher, W. S. (2000). Evaluation Guidelines for Ecological Indicators. Washington D.C. EPA/620/R-99/005. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Research Triangle Park. 107.
- Kim, M., & Lapointe, M. (2011). *Ecology of Freshwater Fish. John Wiley & Sons A/S*, 20, 144–156.
- Kindlmann, P., & Burel, F. (2008). Connectivity measures: a review. *Landscape Ecol*, 23, 879-890.
- Kravchenko, V., & Müller, D. (2008). Seasonal and spatial distribution of noctuid moths (Lepidoptera: Noctuidae) in the northern and central Arava Valley, Israel. *Israel Journal of Entomology*, 38, 19-34.
- Lackey, R. T. (1998). Ecosystem management: paradigms and prattle, people and prizes. *Renewable Resources Journal*, 16(1), 8-13.
- Leech, S., Wiensczyk, A., & Turner, J. (2009). Ecosystem management: A practitioners' guide. *BC Journal of Ecosystems and Management*, 10(2), 1-12.
- Leitao, A. B., Miller, J., Ahern, J., & Mcgarigal, K. (2006). The Selected Set of Landscape Metrics. En *Measuring Landscapes: a planner's handbook* (págs. 63-93). Washington D.C.: Island Press.
- Liu, J., & Taylor, W. W. (2005). Integrating landscape ecology into natural resource management (Book review). *South African Journal of Wildlife Research*, 35(1), 103-104.
- López, R., & Becerril, F. (2000). ¿Meta... qué? ¡Metapoblación!. *Ciencia y Mar*, 29-35.
- Luque, S., Saura, S., & Fortin, M. J. (2012). Landscape connectivity analysis for conservation: insights from combining new methods with ecological and genetic data. *Landscape Ecol* (2012) 27:153–157, 27.
- Martin, B. A., & Saiki M. (2005). Relation of desert pupfish abundance to selected environmental variables in natural and manmade habitats in the Salton Sea basin. *Environmental Biology of Fishes*, 73, 97- 107.
- Morales, R. C., & Rodríguez, M. H. (2011). Cambios en la producción de vapor debido a las condiciones del yacimiento en Cerro Prieto, BC. *Geotermia*, 24(2), 3-10.

- Neel, M. C., McGarigal, K., & Cushman, S. A. (2004). Behavior of class-level landscape metrics across gradients of class aggregation and area. *Landscape Ecology*, 19, 435–455.
- Nelson, E.W. (1921). Lower California and its natural resources. *Memoirs of the National Academy of Sciences*, 16:1-194.
- Nielsen, L. (1983). Variation in the catchability of yellow perch in a Otter trawl. *Transactions of the American Fisheries Society*, 53-59.
- Organisation for Economic Co-Operation and Development [OECD]. (1993). Core set of indicators for Environmental performance reviews: A synthesis report by the Group on the State of the Environment. OCDE/GD, (93)179, 39.
- Phillips, P. L., Welch, J. B., & Kramer, M. (2004). Seasonal and Spatial Distributions of Adult Screwworms (Diptera: Calliphoridae) in the Panama Canal Area, Republic of Panama. *J. Med. Entomo*, 41(1), 121-129.
- Ruiz-Campos, G., Andreu-Soler, A., & Ortiz-Acosta, M. (2010). Prospección de la población del pez cachorrito del desierto (*Cyprinodon macularius*) existente en las lagunas de la planta geotérmica de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, México. Informe Técnico, Julio 2010. 12 p.
- Ruiz-Campos, G., Andreu-Soler, A., & Varela-Romero, A. (2012). Condition status of the endangered desert pupfish, *Cyprinodon macularius* Baird and Girard, 1853, in the Lower Colorado River Basin (Mexico). *Journal of Applied Ichthyology*, DOI: 10.1111/jai.12079
- Ruiz-Campos, G, González-Guzmán, S., & Flores-Galván, M.A. (2012). Manejo poblacional y de hábitat del pez cachorrito del desierto (*Cyprinodon macularius*) en las lagunas de la planta geotérmica de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, México. Reporte final, Proyecto Comisión Federal de Electricidad AA-018TOQ034- N47-2012.
- Scheffer, M., & Van Geest, G. (2006). Small habitat size and isolation can promote species richness: second-order effects on biodiversity in shallow lakes and ponds. *OIKOS*, 112(1), 227-231.
- Sokal, R., & Rohlf, F. J. (1981). *Biometry. 2nd Edition*, Freeman, W. H. & Company 859.
- Sorensen, J., McCreary, S., & Brandani, A. (1992). Arreglos Institucionales para Manejar Ambientes y Recursos Costeros. En *Costas*. Rhode Island: Coastal Resources Center.

- Sutton, R. (1999). The Desert Pupfish of the Salton Sea: A Synthesis. Prepared for the Salton Sea Authority 12.
- Sutton, R. J. (2002). Summer movements of desert pupfish among habitats at the Salton Sea. *Hydrobiologia*, 473: 223–228.
- Turskis, Z., Kazimieras, E., & Peldschus, F. (2009). Multi-criteria Optimization System for Decision Making in Construction Design and Management. *Engineering Economics*, 1(61), 7- 17.
- United States Fish and Wildlife Service [USFWS]. (1993). Desert Pupfish (*Cyprinodon Macularius*) Recovery Plan. Unpublished report to U.S. Fish and Wildlife Service, Region 2, Albuquerque, New México, with assistance from Arizona Game and Fish Department and Tonto National Forest, 129.
- United States Fish and Wildlife Service [USFWS]. (2009). Biological assessment for Land Management Effects on Gila Topminnow & Desert Pupfish in Two Springs and an Artesian Well. U.S. Fish and Wildlife Service, 27.
- United States Fish and Wildlife Service [USFWS]. (2010). Desert Pupfish (*Cyprinodon Macularius*) 5-Year Review: Summary and Evaluation. Phoenix, Arizona: USFWS. 42.
- Van Nouhuys, S. (2009). Metapopulation Ecology. *Encyclopedia of Life Sciences (ELS)*, 9.
- Varela, R. A., Ruiz, C. G., Yépez, V. L., & Alanis, G. (1999). Evaluación de la situación actual de las poblaciones del pez cachorrito del desierto (*Cyprinodon macularius macularius*) en la Cuenca del Bajo Río Colorado, Sonora-Baja California, México. Universidad de Sonora Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. H126. México D. F.
- Varela-Romero, A., Ruiz-Campos, G., Yépez-Velázquez, L. M., & Alaníz-García, J. (2002). Distribution, habitat and conservation status of desert pupfish (*Cyprinodon macularius*) in the Lower Colorado River Basin, Mexico. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 12, 157–165.
- Vila, J. S., Varga, D. L., Llausas, A. P., & Ribas, A. P. (2006). Conceptos y métodos fundamentales en ecología del paisaje (landscape ecology). Una interpretación desde la geografía. *Doc. Anál. Geogr.*, 48, 151-166.