

Proyecto GEF-EEI_Servicios de consultoría para la elaboración de análisis de riesgo y protocolo detección temprana y respuesta rápida para el mejillón cebra (*Dreissena polymorpha*) y Quagga (*D. bugensis*) en México



“Análisis de costo beneficio de las acciones de control para los mejillones cebra (*Dreissena polymorpha*) y quagga (*D. bugensis*) en Tijuana, Baja California”



ROBERTO EDUARDO MENDOZA ALFARO

30 de septiembre, 2019

“Las opiniones, análisis y recomendaciones de política incluidas en este informe no reflejan necesariamente el punto de vista del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, como tampoco de su junta ejecutiva ni de sus estados miembros.”

Título: Análisis de costo beneficio de las acciones de control para los mejillones cebra (*Dreissena polymorpha*) y quagga (*D. bugensis*) en Tijuana, Baja California.

Objetivo: Realizar un Análisis de costo-beneficio de las diferentes opciones de control y manejo para el mejillón cebra (*Dreissena polymorpha*) y el mejillón quagga (*D. bugensis*) para la presa El Carrizo y la planta potabilizadora El Florido.

Autor: Roberto Mendoza, Sergio Luna, Israel Rojo-Ramos, Flor Sánchez & Erika Medina-Arellano

Modo de citar el informe: PNUD México (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). 2019. Análisis de costo beneficio de las acciones de control para los mejillones cebra (*Dreissena polymorpha*) y quagga (*D. bugensis*) en Tijuana, Baja California. Proyecto 083999 “Aumentar las Capacidades Nacionales para el Manejo de las Especies Exóticas Invasoras (EEI) a través de la Implementación de la Estrategia Nacional de EEI”. Mendoza, R., Luna, S., Rojo-Ramos, I., Sánchez, F., Medina-Arellano, E. Laboratorio de Ecofisiología, U.A.N.L., San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. 42 pp.

Área geográfica objeto del informe: Tijuana, Baja California, México.

Fecha de inicio del proyecto: 31/04/2019

Fecha de terminación del proyecto: 31/10/2019

Acciones y objetivos estratégicos del proyecto GEF:

Acciones estratégicas	Objetivos estratégicos
1. Revisar, adecuar y desarrollar el marco legal y normativo	1. Prevenir, detectar y reducir el riesgo de introducción, establecimiento y dispersión de especies invasoras
5. Generar conocimiento para la toma de decisiones informadas	3. Informar oportuna y eficazmente a la sociedad para que asuma responsablemente las acciones a su alcance en la prevención, control y erradicación de las especies invasoras

Resumen: El establecimiento de los mejillones cebra y quagga en el Acueducto Río Colorado Tijuana (ARCT) constituye una invasión que ha generado impactos adversos en las instalaciones donde ha sido detectado. En el presente reporte se presenta el desarrollo metodológico del Análisis Costo-Beneficio para esta invasión, el cual permitió detectar la necesidad de atender las recomendaciones del Sistema de Comando de Incidentes para recoger y reportar la información sistemáticamente de modo que el Análisis Costo-Beneficio sea realizado lo más apegado a la realidad y que sea de fácil comunicación entre las entidades involucradas y los países interesados. Fueron planteados dos casos de estudio, con los cuales quedó evidenciado que las acciones emprendidas sin el escrutinio metodológico y oportuno genera mayores costos en un plazo de 10 años. Así mismo, destaca la necesidad de emprender estudios socio-económicos de mayor alcance que fundamenten los beneficios obtenidos debido al control de las especies invasoras. Esta información es de gran utilidad para la futura formulación de políticas informadas para el manejo de estas especies.

Índice

1. Introducción	1
2. Impactos monetizables y no monetizables	2
3. Criterios de monetización de los costos y los beneficios	3
4. Características biológicas resaltables para el análisis y selección de métodos	3
5. Características esenciales de los métodos para su selección	5
6. Métodos de control típicos e identificación de costos monetizables	7
7. Cronología de la invasión de los mejillones cebra y quagga en el Acueducto Río Colorado-Tijuana (ARCT)	12
8. Caso de estudio 1: presa El Carrizo	18
8.1 Exposición del caso e identificación de costos y beneficios	20
8.2. Propuesta de método de control	22
8.3 Contención y recuperación de mejillones	23
8.4 Celdas móviles para formación de microecosistemas temporales	24
8.5 Control biotecnológico	26
8.6 Costos monetizables de implementación del método de control	27
8.7 Beneficios de implementar el método de control	28
8.8 Costos y beneficios en el tiempo, beneficio neto y descuento	30
9. Caso de estudio 2: planta potabilizadora El Florido	31
9.1 Exposición del caso de identificación de costos y beneficios	32
9.2. Propuesta de método de control	34
9.3 Costos monetizables de implementación del método de control	37
9.4 Costos y beneficios en el tiempo, beneficio neto y descuento	38
10. Recomendaciones finales para el manejo integrado de las especies	38
Referencias	41

1. Introducción

Los bienes y servicios que las personas reciben de los recursos naturales pueden ser considerados desde un punto de vista económico, ya que sustentan diversas actividades productivas como la agricultura, ganadería, pesca, explotación de recursos forestales, etc. Estos beneficios reciben el nombre de servicios ecosistémicos, los cuales resultan críticos para el desarrollo económico a nivel regional (De Groot *et al.*, 2012; Grizzetti *et al.*, 2016). Las invasiones biológicas, por lo general, se desarrollan en detrimento de estos servicios ya que su introducción ocasiona no solamente daños directos en las poblaciones y ecosistemas nativos, sino que a su vez generan impactos negativos en diversas actividades comerciales productivas, culturales y recreativas. Sin embargo, se ha demostrado que los impactos de las especies invasoras pueden evitarse mediante la prevención, eliminarse mediante la erradicación o reducirse mediante el control (Brown & Daigneault, 2014).

Por lo anterior, resulta de gran utilidad contar con información detallada de los métodos de control de una especie y analizar los costos y beneficios de las opciones de manejo disponibles, ya que esto permite a los tomadores de decisiones formular políticas más informadas para el manejo de estas especies. Una de las herramientas más destacadas para este propósito es el análisis de costo-beneficio (*Cost-Benefit Analysis*, CBA), debido a su facilidad de manejo, transparencia metodológica y amplia adopción entre los gobiernos y los responsables de la política ambiental (Brown & Daigneault, 2014). Para esto es necesario estimar las pérdidas económicas derivadas de los impactos ocasionados por las especies invasoras y los costos de las posibles formas de control o erradicación y su eficiencia a corto y largo plazo (Brown & Daigneault, 2015).

Con base en lo anterior, se presenta un análisis costo-beneficio cuya finalidad es definir el método más efectivo de control para definir una estrategia de control y erradicación de los mejillones dreisénidos que han invadido Baja California. Para este propósito se siguió la metodología general propuesta por Brown & Daigneault (2015). Los métodos de control fueron seleccionados de acuerdo a la revisión de la literatura presentada por PNUD México (2019a) y adaptados teóricamente al escenario nacional, el cual fue construido con información anecdótica y única disponible debido a que todos los reportes de mejillones en

el Acueducto Río Colorado Tijuana (ARCT) han sido clasificados como confidenciales. Con esto se estableció la ***línea base del costo-beneficio*** para el manejo integrado de los mejillones cebra y quagga en México.

Existen muchos argumentos a favor de valorar los servicios ecosistémicos y el capital natural de las naciones (De Groot *et al.*, 2012; Grizzetti *et al.*, 2016), e igualmente existen argumentos que consideran que este tipo de valuación subestima el valor real de estos servicios, ya que este valor tiene un componente subjetivo no mercantilizable, por lo cual es irreal ponerle precio ya que es un componente ligado al estado de salud de los recursos naturales y que impacta de forma indirecta en las actividades económicas con las que se relacionan (Toledo, 2014; Peba-Ocampo, 2018). Con estos planteamientos de referencia, complementarios entre sí, se siguió el proceso analítico descrito por Brown & Daigneault (2015), quienes señalan que las invasiones biológicas constituyen un problema fundamentalmente de índole económico, ligado a las consecuencias intencionales o no intencionales derivadas de las actividades económicas con que se relacionan. Esta simplificación práctica fue adaptada para el desarrollo del presente documento y como último paso permite hacer las consideraciones necesarias para el manejo integrado del problema de la invasión de los mejillones dreisénidos.

2. Impactos monetizables y no monetizables

Se consideraron como ***impactos monetizables*** aquellos que influyen directamente sobre las actividades económicas que se llevan a cabo en los ambientes naturales o artificiales donde se han establecido o se pueden establecer los mejillones dreisénidos. Estos impactos monetizables pueden ser negativos o positivos. También pueden ser considerados como impactos monetizables los efectos sobre la economía y la salud, pero cuyo efecto es secundario. Por ejemplo, los cortes de agua afectarían la economía de las ciudades para lo cual se requeriría un estudio socioeconómico integral. No obstante, sí se podría evaluar de forma directa el impacto sobre el rendimiento de producción considerando el volumen de las cosechas.

Partiendo de esta clasificación, fueron considerados como *impactos no monetizables* aquellos intrínsecos a la presencia de estas especies exóticas pero que no afectan directamente a las actividades económicas que ya se están desarrollando, aunque no así en la economía global de la región. Dentro de los *impactos no monetizables* se encuentra el valor psicológico y cultural de las zonas afectadas y la valoración particular que le dan los habitantes, por lo que, al carecer de esta información, no fueron tomados en cuenta para el análisis costo-beneficio. Sin embargo, estos aspectos se consideran de suma importancia para presentar los posibles escenarios del manejo integrado de las especies y como referencia para los protocolos de detección temprana y respuesta rápida.

3. Criterios de monetización de los costos y los beneficios

En este estudio, el *monto de los beneficios* es el precio que resulta al evitar los daños a las actividades económicas que se desarrollan en las zonas donde se reportan o pueden establecerse los mejillones, mientras que el *monto de los costos* es el valor de cada uno de los componentes de los métodos de control y su implementación.

4. Características biológicas resaltables para el análisis y selección de métodos

Tener presente las características del ciclo de vida de estos organismos es de suma importancia para la selección de los métodos de control respecto al tiempo y a las vulnerabilidades intrínsecas a su biología. Por lo cual se presenta la información del ciclo de vida de los mejillones dividido por etapas del desarrollo y los días que se requieren para que se complete cada etapa, atendiendo la sugerencia de que ambos mejillones tienen un desarrollo similar (Tabla 1). En el ciclo de vida destaca que el mejillón cebra desova en aguas más cálidas que el quagga. La filtración empieza una semana después durante la etapa larvaria y es, principalmente, para obtener el calcio para la formación de su concha. Después, requieren encontrar un sustrato adecuado para continuar su desarrollo y seguir secretando su concha. Durante esta etapa se presenta la mayor mortalidad dependiente de las condiciones ambientales. Posterior a esta etapa, cada adulto empieza la alteración del

ambiente por su naturaleza filtradora y se hacen evidentes los impactos negativos producto de las bioincrustaciones. Antes de que termine el primer año de vida empezarán a reproducirse, agravando los problemas que hayan causado hasta ese momento.

Tabla 1. Ciclo de vida de los mejillones cebra y quagga.		
TIEMPO	DESCRIPCIÓN	MODO DE VIDA
Día 0, Desove	Los mejillones cebra y quagga requieren temperaturas de 12 a 17°C y 4.8 a 11°C, respectivamente. Su crecimiento y desarrollo estará acoplado a señales químicas de florecimientos de microalgas. Ocurre 2 veces/año. Cada hembra puede producir hasta 1 millón óvulos/ año. Las larvas velígeras recién eclosionadas miden 40-70 µm. Los mejillones son dioicos y algunos mejillones cebras son hermafroditas.	BENTÓNICO Dependiente de temperatura y florecimientos algales
Día 1, Fertilización	De las 0h-22h. Motilidad del esperma durante 22h.	
Día 1 a 5, Desarrollo embrionario	A partir de las 6h después de la fertilización y hasta el día 5.	PLANCTÓNICO Dependiente de calcio
Día 5, Larva trocófora	Periodo muy breve. Miden 80-100 µm	
Día 6, Larva velígera	Empieza a filtrar	
Día 9, Pedivelígera	Empieza la secreción de la concha	
Día 10 a 19, Desarrollo	Periodo de organogénesis y hundimiento lento por el peso de la concha joven. Miden de 180-290 µm.	BENTÓNICO
Día 19 a 90, Primer asentamiento, inicio de la vida adulta	Primer asentamiento. Depende de qué tan rápido encuentren un sustrato adecuado. Generalmente empieza a los 19 días en <i>D. polymorpha</i> y a los 29 en <i>D. bugensis</i> . Mortalidad de hasta el 99%.	
Día 365-730, madurez reproductiva	Algunos mejillones cebra ya son activos con solo 3.5 cm antes de cumplir el año. Alcanzan los 2.5-3.5 cm (mejillón cebra) y 5.1 cm (mejillón quagga).	
Día 1825-2190 (5-6 años)	Muerte	

Así mismo, la comparación de otras características ecofisiológicas permite observar que el mejillón cebra es un colonizador más eficiente debido a su mayor capacidad de dispersión que el quagga. Sin embargo, por poseer múltiples adaptaciones ambientales el quagga es un competidor más eficaz por los recursos, principalmente espacio. También destaca la diferencia de la profundidad a la que habitan, siendo el quagga quien puede establecer poblaciones en un amplio rango de profundidad y de sustrato. Esta diferencia les permite establecer poblaciones abundantes tanto en meses cálidos como en fríos. Todo esto explica

por qué estos organismos constituyen una seria amenaza, tanto por competencia como por la generación de perturbaciones químicas y biológicas.

Por otra parte, un aspecto importante a considerar son las especies que habitan junto con los mejillones, sobre todo los uniónidos. Por lo que, debido a la dificultad de contar con un método de control especie-específico, se deben atender las recomendaciones del “Plan de Respuesta Rápida” y el análisis de la información de las colonizaciones o infestaciones mediante las plantillas de Información del Análisis de Riesgo para la infraestructura de presas y plantas de tratamiento (PNUD México, 2019b) para evitar en la medida de lo posible la afectación colateral al atacar las vulnerabilidades principales encontradas en los mejillones dreisénidos: fijación de calcio, estacionalidad de la abundancia potencial de sus poblaciones y el acceso a alimento, así como la posible duración de la respuesta de resistencia de parte de los mejillones dreisénidos.

5. Características esenciales de los métodos para su selección

Thomas (2010) encontró que los cuerpos de agua altamente propensos a ser invadidos por mejillones cebra presentaban mucha actividad humana, niveles de calcio aptos para el desarrollo de las velígeras y propágulos, y recepción de agua de otros cuerpos invadidos por mejillones cebra. Por esto, se recomienda utilizar métodos universales con versatilidad para ser utilizados en sistemas abiertos, cerrados, naturales y artificiales con el objetivo de frenar el crecimiento poblacional de los mejillones. Métodos que requieran labor de implementación mínima y capaces de eliminar mejillones en todos los estadios, además de propiciar el desprendimiento de mejillones en fase fijación y evitar el asentamiento de las fases planctónicas (Tabla 2). Por otra parte, se deben seleccionar los métodos de menor impacto colateral y considerar afectaciones al consumo humano y procesos de bioacumulación ambiental.

Tabla 2. Ecofisiología comparada de los mejillones cebra y quagga. Características diferentes y compartidas (PNUD México, 2019ª).		
	CEBRA	QUAGGA

Morfología	25-35 mm, vista dorsal redondeada. Conchas resistentes a los depredadores. Bando y morfología constante.	51 mm, vista dorsal alargada. Conchas frágiles, dependiendo del morfotipo. Pueden no tener bando. Morfologías epilíticas parecidas a las del mejillón cebra que se adhieren a sustratos duros, y profundos con concha alargada frágil que se entierran en fondos suaves, solo sacando el sifón
Fijación	La segregación de filamentos del biso depende de las condiciones fisicoquímicas del agua. Todos los estadios se fijan y desprenden voluntariamente para dispersarse a distancias cortas o río abajo a grandes distancias. Fuerza de adhesión variable, dependiente de los materiales del sustrato.	
	Rápida para adaptarse a corrientes fuertes e inestables. Prefiere plantas sumergidas en el agua. Profundidad promedio 4-7 m, aunque pueden llegar a sobrevivir a los 50 o 60 m. Detectan depredadores y disminuyen su metabolismo. Capaces de secretar más biso para mayor fijación. Reducen la fuerza del biso si hay conspecíficos heridos y cambian a dietas más fáciles de digerir. Colonizador más exitoso que el quagga.	Más lenta que el mejillón cebra. Se entierra en sustratos suaves. Habitan a los 4-10 m en promedio y se les puede encontrar hasta los 60 m. Más tolerantes a profundidad que el mejillón cebra. Colonizan una mayor diversidad de sustratos arenosos, grava y guijarros que el mejillón cebra. Cuando coexisten con el mejillón cebra, lo desplazan.
Filtración	Partículas de 0.7-1.2 μ m de fitoplancton, zooplancton, bacterias, detritus. A los 10-20°C, un individuo de 20 mm filtra en promedio 2.5 L/día. Las algas pequeñas que sobreviven al proceso de digestión son resuspendidas en la columna de agua o son excretadas como pseudoheces hacia el fondo pasando a formar parte del sustrato, concentrando nutrientes y metales con lo que favorecen los florecimientos algales. La filtración es inhibida una vez que la corriente excede al flujo máximo.	Un adulto puede filtrar más de 1L/día. Con concentración de alimento óptima, la tasa de bombeo y la tasa de respiración son similares. Si el alimento es escaso, la tasa de respiración disminuye a un metabolismo basal.
Distribución	Zonas geoestratégicas de mayor riesgo de introducción en frontera noreste, del lado del Golfo de México	Zonas geoestratégicas de mayor riesgo de introducción en frontera noroeste, del lado del Pacífico
	Dispersión ligada a las actividades humanas.	
Fisicoquímica	El mezclado vertical de la columna de agua favorece la formación de conglomerados de larvas entre los 3 y 7 m.	
	Límite inferior y superior de 6-12°C y 26-35°C. La mortalidad aumenta después de los 28°C y se incrementa hasta los 35°C.	Sus límites de temperatura fluctúan de 4.8-16°C. No soporta altas temperaturas como el mejillón cebra.
	Soporta salinidades de 0.6-12‰, por lo que habitan aguas dulces y salobres próximas a la costa. A mayor temperatura muestran menor tolerancia a la salinidad.	Soporta menor salinidad que el mejillón cebra: 4 - 5‰. Pueden reproducirse en aguas de hasta 3‰.
	Soportan concentraciones de oxígeno de 2-6 ppm. Colonización eficaz en vegetación litoral.	Más tolerantes a la hipoxia que el mejillón cebra. Colonización eficaz en aguas hipolimnéticas. Soportan anoxia a >15m de profundidad. Están adaptados a la poca disponibilidad de alimento y

		oxígeno en aguas profundas. En aguas superficiales están adaptados a mayores fluctuaciones de temperatura.
	Concentración de calcio para lograr establecer poblaciones abundantes 12-28 mg/L. Requerimiento menor en América que en Europa, 4-19 mg/L y 20-14 mg/L, respectivamente. Incluso hasta 45-78 mg/L.	La concentración óptima de calcio para crecimiento de la concha y establecimiento exitoso es 25 mg/L. Pueden habitar en aguas con concentraciones de 12.4 a >100 mg/L.
	La concentración de la forma soluble del calcio depende del pH, pudiendo ocurrir mortalidad por descalcificación. Ocurre para el quagga a 9.4 y para el mejillón cebra ocurre entre 7.3 y 6.9.	
Depredadores	Compiten con esponjas por sitios de fijación y por alimento. El mejillón quagga es el único competidor que logra erradicar al mejillón cebra. Sus larvas son consumidas por un cnidario y un solo acocil puede depredar selectivamente hasta 79 mejillones cebra al día, mientras que los rutilos los consumen estacional y exclusivamente. Otros depredadores son: peces (mojarra, perca, orejona, corvina), patos, nutria y tortugas en cautiverio.	Las esponjas son sus competidores y una diversidad de especies de peces malacófagos son sus depredadores, así como algunos crustáceos y nutrias.
Amenazas	Comienzan a parasitarse desde etapas larvarias sin que amenacen sus poblaciones, pero sí a los organismos que los ingieren (invertebrados, peces y aves). La diversidad de alimento modifica la respuesta de sus hemocitos ante los patógenos. Acumulan 300,000 mil veces más bifenilos policlorados (PCB) y los polibromodifenil éteres (PBDEs), aumentando la exposición de estos tóxicos a humanos y animales. El mejillón quagga los acumula más por contener más lípidos. Las larvas resisten la desecación y periodos prolongados fuera del agua (menores a 1 mes). Las conchas de los mejillones muertos participan en ciclos biogeoquímicos consumiendo oxígeno. Los mejillones quagga son fuente de tiaminasa, de 50 a 100 veces más activa que la de los peces, lo que provoca deficiencias de vitamina B en los peces y su muerte. La tiaminasa del mejillón quagga es más activa que la del mejillón cebra.	
	Pueden convertirse en poblaciones de invertebrados dominantes en el bentos con densidades de hasta 750,000 individuos/m ² . El impacto negativo de su filtración inicia con densidades altas de 5,000 – 770,000 ind/m ² . Seleccionan y evitan la ingestión de florecimientos tóxicos, dejándolos disponible para sus competidores.	Densidades de 130 ind/m ² son suficientes para la pérdida de taxa en ríos.

6. Métodos de control típicos e identificación de costos monetizables

Los métodos de control para los mejillones fueron anteriormente revisados por PNUD México (2019a), por lo que aquí se presenta de forma resumida añadiendo algunos aspectos

relevantes para ser considerados en los posibles costos y esfuerzos que fundamentan las decisiones para su selección (Tabla 3).

Tabla 3. Métodos de control. Todos los métodos conllevan costos de implementación, esto se refiere al tiempo y salario de los esfuerzos del personal necesarios para aplicar el método. Datos resumidos del primer informe (PNUD México, 2019a).		
Método	Elementos	Costos
Físicos		
Limpieza manual de embarcaciones	Normatividad gubernamental e implementación por la ciudadanía. Se puede recibir algún incentivo para ello. Herramientas para bombeo de agua a presión y temperatura elevadas. Estaciones de limpieza monitoreadas que podrían estar enlazadas con la página de especies invasoras para que la gente acuda a hacer sus registros de forma gráfica o contestando un cuestionario.	\$ Estaciones de limpieza (infraestructura) \$ Salario de los operadores \$ Suministro de presión y temperatura \$ Incentivos \$ Mantenimiento de la red de monitoreo \$ Desarrollo de normatividad
Flujo de agua en tuberías	Flujo de gran cantidad de agua en tuberías y con velocidades mayores a 1.5 m/s y presión elevada. Sistema de recolección de material desprendido.	\$ Fuente de presión / velocidad \$ Colecta de material desprendido \$ Contención de larvas traslocadas \$ Implementación operacional
Remoción mecánica en tuberías	Tapones expandibles de poliuretano poroso que raspan y remueven los mejillones a medida que son arrastrados por agua a gran velocidad. Se necesita recuperar los mejillones en las salidas de las tuberías. No permite remover larvas por lo que se mantiene la población a raya con periodicidad frecuente del proceso (mínimo 2 veces al año). Se puede aplicar un tratamiento secundario o invertir el flujo de los efluentes y revisar los efluentes para evitar nuevas introducciones.	\$ Tapones expandibles \$ Fuente de velocidad \$ Colecta de material desprendido mediante enrejado \$ Contención de larvas traslocadas \$ Tratamiento secundario \$ Implementación operacional
Sistemas de filtración	Filtración en tándem con diversos tamaños de poro. Para contención o prevención de introducciones.	\$ Sistema de bombeo \$ Tándem de filtros de 30-70µm para huevos y larvas jóvenes, 170-280µm larvas previas a la adherencia, 2-4mm para adultos \$ Limpieza de los filtros \$ Implementación operacional
Golpes térmicos	Temperaturas elevadas hasta el punto donde los mejillones ya no logren aclimatarsen o resistir y mueran. Existe la modalidad en frío y calor. Estas pueden aplicarse de forma aguda o de forma crónica. La forma aguda consiste en aumentar la temperatura súbitamente, mientras que la crónica se aplica en sistemas en los que se puede elevar la temperatura de forma gradual y además se puede mantener	\$ Fuente súbita de calor o frío \$ Sistema sostenido de calor o frío \$ Sistema de congelamiento \$ Colecta de valvas \$ Implementación operacional

	durante periodos muy largos. De forma análoga se busca la mortalidad del 100% por congelamiento a -10°C en menos de 2 horas.	
Deshidratación por desecación	Baja súbita y prolongada de la disponibilidad de agua. Normalmente el vaciado del agua se realiza por más de 10 días. Se pueden seleccionar ciertas zonas para disminuir la cantidad de esfuerzo y sustancias que pueden complementar el tratamiento.	\$ Sistema de bombeo \$ Cuerpo receptor o contenedores del agua \$ Tratamiento secundario \$ Implementación operacional
Shock eléctrico	Una exposición de al menos 100 V/cm logra un daño físico permanente en los mejillones adultos y mata a las larvas velíferas, post-velíferas y juveniles. Exposiciones prolongadas de 5kV pueden matar al 53.7% de mejillones adultos en tuberías de PVC.	\$ Fuente de corriente eléctrica \$ Colecta de valvas \$ Control de adultos \$ Implementación operacional
Sistemas de presión	En tuberías se aplican pulsos de presión de 0.04 MPa y 0.16 J/m ² para impedir el asentamiento de las larvas y de 0.23 MPa y 5.8 J/m ² para la muerte de mejillones adultos	\$ Sistema de pulsos de presión \$ Colecta de valvas \$ Implementación operacional
Electromagnetismo de baja frecuencia	Formación de burbujas electromagnéticas en las que se suspenden las larvas y se evita la fijación del calcio. Se logra el 100% de mortalidad al implementarse durante 2 semanas.	\$ Sistema electromagnético \$ Implementación sostenida \$ Colecta de valvas
Ondas de radio	Exposición a 500 Hz por 40 días para mantener soluble el calcio en el agua, de modo que se interrumpe el ciclo biológico de la colonia completa	\$ Generador de ondas de radio \$ Colecta de valvas \$ Implementación sostenida
Biológicos		
Enemigos naturales	Competidores por espacio o recursos (acociles, nutrias y otros dreisénidos), depredadores del organismo (Peces con dientes faríngeos molariformes y aves acuáticas), parásitos o patógenos letales para los mejillones.	\$ Estudio de viabilidad \$ Compra o producción de enemigos naturales. \$ Contención de enemigos \$ Plan de manejo y monitoreo \$ Implementación
Zequanox	Cepas de bacterias que causan lisis del sistema digestivo.	\$ Compra del producto \$ Almacenamiento y transporte \$ Remoción de valvas \$ Control de subproductos \$ Implementación
Químicos		
Sustancias reguladoras del desove	Inhibidores o promotores del desove a favor de potenciar la mortalidad por desfase de condiciones ambientales favorables. Poco específico para otros organismos. Por ejemplo, inductor de serotonina 5-HT; ISHS inhibidor de la bomba de recaptación de	\$ Sustancias. \$ Manejo y preparación de sustancias \$ Monitoreo de mejillones \$ Manejo de mejillones adultos

	serotonina; metihiothepin y metergoline antagonistas de 5-HT.	\$ Contención de huevos y larvas \$ Implementación operacional
Sustancias oxidantes	Requieren control en su manejo para que otros organismos o sus poblaciones no se vean afectados. Muy eficaces, a menudo corrosivos, costosos excepto el cloro. Cloro (en forma gaseosa, hipoclorito de sodio líquido, hipoclorito de calcio en polvo); ClO ₂ (Dióxido de cloro); NH ₂ Cl (Cloraminas); O ₃ (ozono); H ₂ O ₂ (peróxido de hidrógeno); Bromo; KMnO ₄ - (permanganatos, como el permanganato potásico)	\$ Sustancia \$ Almacenamiento y transporte \$ Remoción de valvas \$ Control de subproductos \$ Implementación operacional
Sustancias no oxidantes	Más costosos que las sustancias oxidantes, pero en general con tiempos de exposición efectivos más cortos, ya que los mejillones no los detectan. Se inactivan fácilmente y rara vez forman subproductos tóxicos. A mediano plazo pueden resultar menos costosos y más eficaces que los oxidantes, si se aplican en forma intermitente, periódica o semi-continua para el control de mejillones adultos. Ejemplo: KCl (afecta sistema respiratorio y de filtración).	\$ Sustancia \$ Almacenamiento y transporte \$ Remoción de valvas \$ Control de subproductos \$ Implementación operacional
Sustancias quelantes-no oxidantes	EarthTec QZ® (iones de Cu ²⁺ de unión a moléculas de carga negativa para quelarlas e impedir su función; 0.30 ppm de Cu ²⁺ , durante 168 h para una mortalidad del 100%). BULAB2006®, los moluscos tampoco lo detectan y dejan sus valvas abiertas, 8 ppm durante 144 h presentaron una mortalidad del 100 %. Macrotech (generador de iones de cobre para eliminación de microorganismos y mejillones).	\$ Del equipo \$ Sustancia y dosis \$ Colecta de las valvas \$ Implementación operacional
Encapsulados químicos	Encapsulado de alguna sustancia en partículas comestibles de 100 µm para alcanzar la mortalidad con menor cantidad respecto a la utilización de la misma sustancia de forma libre.	\$ Del encapsulamiento \$ De la sustancia \$ Colecta de las valvas \$ Implementación operacional
Genéticos		
Diversos	Técnicas como CRISPR-Cas9 para introducir una mutación deletérea y esparcirla mediante genética dirigida para eliminar las poblaciones de mejillones. O eliminación de genes esenciales para la fisiología del organismo. Introducción de neoplasia diseminativa en la población.	\$ Desarrollo del protocolo \$ Manejo de las poblaciones \$ Interacción con los grupos de investigación \$ Implementación operacional \$ Materiales y equipo de laboratorio \$ Personal especializado

En ocasiones, la complejidad del problema de invasión y del ambiente en el cual se desarrolla hacen que la mejor opción sea la combinación de varios métodos de las diversas categorías mencionadas anteriormente en un manejo integrado. La adaptación e

implementación de los métodos propuestos para el control y manejo integrado de los mejillones del presente proyecto (Fig. 1) es explicada para el caso de la presa El Carrizo y de la planta potabilizadora El Florido, Baja California, en las siguientes secciones.



Figura 1. Estrategia general propuesta para el control de mejillones

Teniendo en cuenta las consideraciones establecidas en el análisis de riesgo y Respuesta Rápida (PNUD México, 2019^b y 2019^c), se seleccionaron estos métodos de control debido a que son de los más inocuos para el ambiente. Por ejemplo, el hipoclorito de sodio es el desinfectante universal utilizado en los procesos de potabilización de agua, y las ondas de radio de frecuencia extremadamente baja y el Zequanox[™] son avalados por la US-EPA como inocuos para el ambiente. Si en algún caso extremo se presentara la formación de compuestos secundarios por la reacción de cloro con materia orgánica, las ondas de radio los neutralizarían con el calcio soluble. Las ondas de radio inducen daños y muerte en los estadios con concha debido a la extracción del calcio y junto con el calcio ambiental, induce cambios en la polaridad de estas moléculas, reduciendo la disponibilidad de éste para las larvas que lo necesitan para superar la etapa de mayor mortalidad e induciendo el desprendimiento de formaciones calcáreas o películas (biofilms) hechas por los mejillones. Adicionalmente, se planteó administrarlos de manera localizada y por periodos suficientes para superar los tiempos de resistencia que pudieran presentar los mejillones, así como en un diseño de microambientes que maximizan el efecto de los tratamientos, lo que permite disminuir las concentraciones, incluso del tratamiento con Zequanox[™], el cual será aplicado como método terminal para asegurar la muerte de los estadios filtradores que estarían

severamente debilitados. Por todas estas razones, se espera que el diseño de implementación sea inocuo en su utilización en la planta potabilizadora El Florido y en la presa El Carrizo, tanto por su naturaleza como por las concentraciones planteadas y de fácil atenuación de los efectos secundarios ambientales que pudieran presentarse, es decir, es seguro desde el punto de vista ambiental (PNUD México, 2019c).

7. Cronología de la invasión de los mejillones cebra y quagga en el Acueducto Río Colorado-Tijuana (ARCT)

El Sistema de abastecimiento de agua de la Ciudad de Tijuana opera con aguas del Río Colorado mediante el Acueducto Río Colorado-Tijuana (ARCT). Las aguas del Río Colorado viajan desde la Presa Morelos, cuya obra de toma se localiza a 100 m de la frontera con EE. UU., hasta llegar a la Presa El Carrizo, en Tijuana, B.C., en donde es almacenada para después ser enviada a la potabilizadora El Florido, en donde es purificada y distribuida para el servicio de la población (Figs. 2-4) (CEA, 2019; CESPT, 2019).

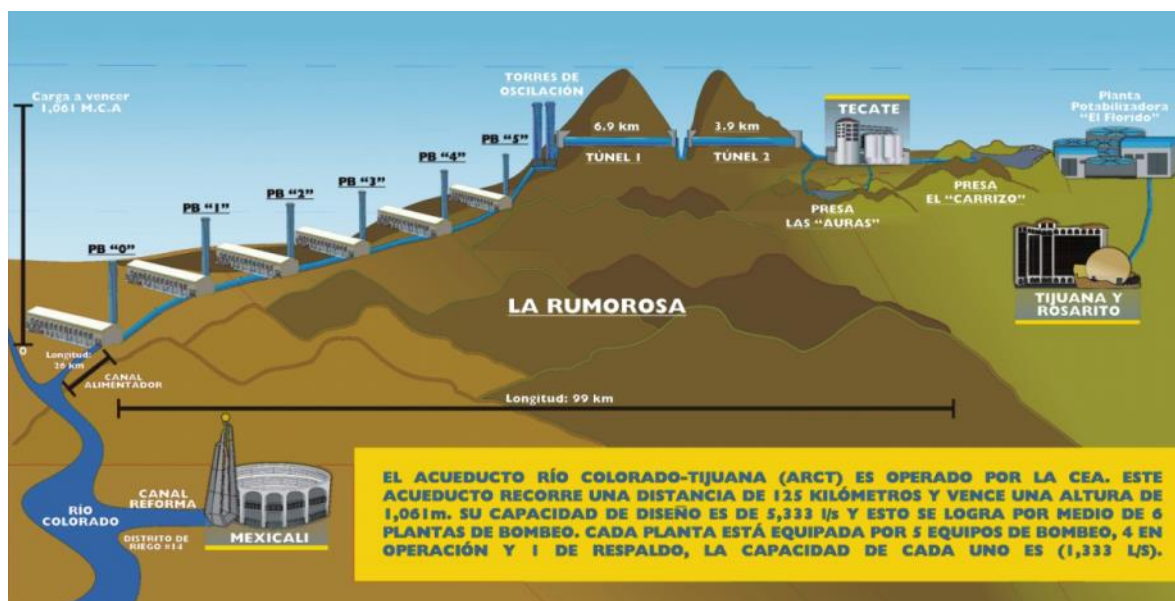


Figura 2. Representación del ARCT según la Comisión Estatal del Agua BC. <http://www.ceabc.gob.mx/documents/arct/perfil.pdf>

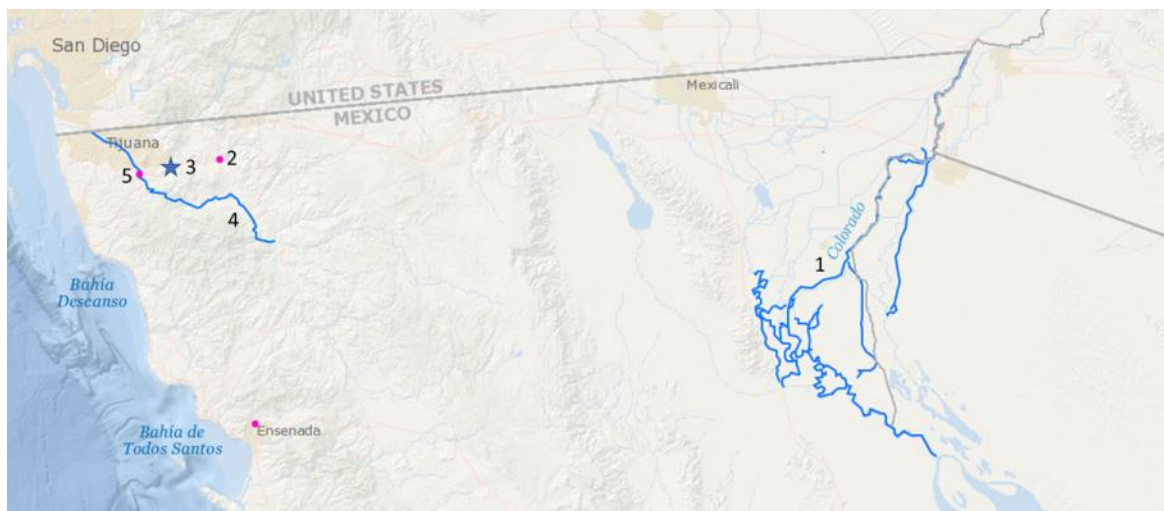


Figura 3. Mapa del norte de Baja California mostrando los cuerpos de agua que han sido colonizados por el mejillón quagga (numerados en orden de aparición de los dreisénidos). 1. Río Colorado; 2. Presa El Carrizo; 3. Potabilizadora El Florido; 4. Río Tijuana; 5. Presa Abelardo L. Rodríguez (Tomado de CONAGUA, 2018).

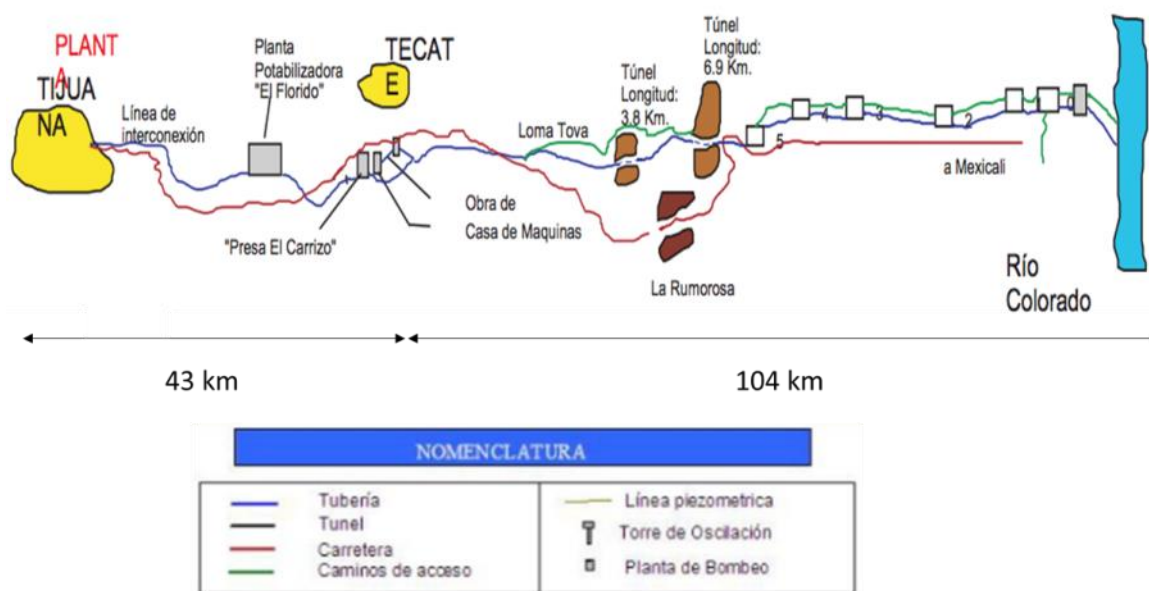


Figura 4. Diagrama del ARCT según la CESPT (2019).

[https://www.cespt.gob.mx/culturaagua/pdf/articulos/Acueductos\(03\).pdf](https://www.cespt.gob.mx/culturaagua/pdf/articulos/Acueductos(03).pdf)

La presa El Carrizo y la potabilizadora de agua El Florido presentan infestación de mejillones. En este último se reportó el aclaramiento de agua y tuberías obstruidas. Ambos son ambientes artificiales, con poblaciones localizadas y reporte de afectaciones a la actividad económica de la planta de tratamiento. No se ha reportado control en la propagación del mejillón dentro de la presa ni en la planta. En una nota periodística queda claro que se

desconoce la procedencia de los mejillones, aunque se describen algunos acontecimientos cronológicos del problema en estos componentes del ARTC (Tabla 4) (Mercado-Juárez, 2014).

Tabla 4. Cronología de la infestación en la planta potabilizadora El Florido y en la presa El Carrizo del ARTC-CESPT, de acuerdo con Mercado-Juárez (2014).

Año	Lugar	Evento
2011	El Florido	Extracción de conchas 13m ³ /3 meses, equivalente a 0.15m ³ /día.
2012	El Carrizo	En noviembre se encontró el cárcamo de bombeo Toyota infestado. Coloración del agua atípica, parduzca. Al mejillón cebra se le relacionó con babosas y caracoles que destruyen jardines. Las paredes de la obra de toma y tuberías aguas abajo resultaron infestadas.
2013	El Florido	Infestación en tuberías, filtros y tomas. Estimación para reparaciones en El Florido y El Carrizo por 38 mdp.
2014	El Florido	En mayo se realizó la limpieza por inspección extrayendo 2 m ³ /día de conchas en canaletas de clarificadores y filtros. Se señala junio, julio y agosto como meses de reproducción prolífica. Se retiraron las conchas de forma manual y se transportaron en 81 camiones de la empresa GEN cada 3 meses. Los daños incluyen reducción de diámetro inferior de los ductos, disminución de flujo de agua, taponamiento, corrosión, bloqueo, desequilibrio en el flujo, tanto en tuberías de captación y distribución, como en compuertas, rejas de desbaste, tuberías y válvulas, estaciones de bombeo, filtros, medidores de flujo y nivel, embalses, depósitos de captación y almacenamiento posterior.
2014	El Carrizo	Las autoridades administrativas se deslindan de haber iniciado la infestación hacia el Florido aludiendo que en los últimos años el nivel de agua de la presa ha sido menor a su capacidad de extracción y se ha completado el bombeo al Florido con agua del acueducto Las Auras en Tecate cuya infraestructura es nueva y no está contaminada. Señalan que El Florido infestó al Carrizo.

Además, en dicha nota puede leerse: “...la variedad cebra... adherida a las canaletas de los clarificadores y cuyas conchas colman totalmente los filtros de la planta potabilizadora de El Florido. ... Los daños... en la presa y planta potabilizadora, han dejado obsoletas instalaciones primarias y equipo, así se asentó en un dictamen colegiado de CESPT, CONAGUA y CEA. ...se tendrían que aplicar grandes cantidades de sustancias, lo que causaría una alta toxicidad en el agua... La única solución viable es la renovación total de dispositivos ... en 38 millones de pesos, con esa inversión se cambiarían las tuberías, filtros, tanques y las tomas... los meses de junio, julio y agosto, los de mayor reproducción... la CESPT ha disminuido el uso de sustancias químicas, dada “la claridad del agua que los mejillones propician” ... El Florido y de la presa El Carrizo. En el dictamen concluyeron: “... para su

*prevención y saneamiento, se requerirán medidas de mitigación y control, y de procedimientos de tratamiento físicos y químicos...” en la potabilizadora ... particularmente en el Módulo Uno de la planta, el cual registra el mayor grado de contaminación, al localizarse adherida a las paredes el 90 por ciento de la plaga extraída... fueron acumulados cerros de conchas... y se enviaron al relleno sanitario de Valle de Las Palmas... en la potabilizadora El Florido ... los filtros... los más colmatados de conchas que ahí quedan retenidas hasta su remoción manual y ... mecanismo hidráulico para su fácil extracción. Aunque la comisión constató la presencia... en los filtros del sistema de agua potable de El Florido... Control de CESPT... aseguró que no hay ni contaminación del agua, ni daño en la infraestructura hidráulica... no se requiere de medidas adicionales en los procesos de potabilización del agua... En el caso de la potabilizadora, ... CONAGUA recomendó lo siguiente: * El uso, de cuando menos, los siguientes reactivos: cloro, dióxido de cloro, ozono, peróxido de hidrógeno, bromo y permanganato de potasio. * Tomar muestras representativas en los diferentes ciclos de vida de la plaga y aplicar los productos seleccionados para la prueba. * Diseñar y construir una caseta de aplicación y dosificación del reactivo en la obra de toma, y otra caseta entre la obra de toma y la entrada a la potabilizadora. Para contrarrestar la contaminación en la presa, determinó: * Prohibir el uso de embarcaciones en la presa o garantizar su desinfección. * Prohibir la pesca para evitar el uso de larvas de mejillón como carnada. * Controlar el pH en la caseta de aplicación del reactivo... “tenemos que aprender a vivir con ellos, a lo mejor en lo futuro encontremos la manera de erradicarlo...” lo que determina su grado destructivo de los cuerpos e infraestructura de agua donde se adhiere y expande... su alta capacidad de reproducción... Incrementar el movimiento del agua y el uso de sustancias químicas, son las recomendaciones que especialistas dictan para limitar su crecimiento...”.*

Supuestamente los mejillones estaban desde 2011 en “El Florido” y pasaron a “El Carrizo”, sugiriendo que viajaron en sentido contrario al flujo del acueducto. A este respecto, cabe mencionar que el riesgo de invasividad alto es promovido por tres factores: actividad humana, niveles de calcio y dirección del flujo de agua y/o conectividad (Thomas, 2010). En

este caso, el agua fluye de la presa “El Carrizo” a la potabilizadora “El Florido”, por lo que no es posible que las larvas hayan viajado en contra del flujo del acueducto, sobreponiéndose a los daños por la turbulencia, aunque la distancia del viaje es menor de 20 km (Bobeldke, 2005). Por otra parte, una nota periodística diferente reporta que hay mejillones establecidos en el ARCT y que las medidas tomadas para la erradicación de esta especie son probablemente nulas (ZETA, 2014). Con esta información se puede deducir que los mejillones provienen del Río Colorado, y debido al flujo del agua estos ingresaron al ARCT arrastrando larvas hasta El Carrizo (Fig. 5). Sin embargo, no se pueden descartar otros mecanismos de dispersión como son el factor humano y la foresis (PNUD México, 2019^a).

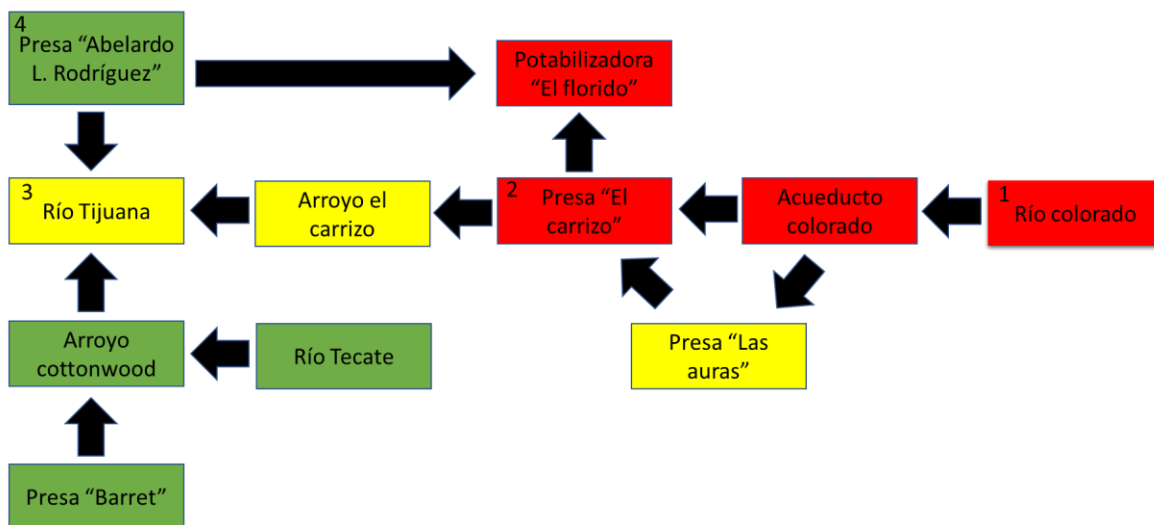


Figura 5. Flujo de agua de los componentes del ARCT. Rojo: Sitios en los que se ha reportado la presencia del mejillón; Amarillo: Sitios en los que posiblemente ya se encuentra establecido; Verde: Sitios cercanos que presentan un menor riesgo de ser invadido debido a la dirección del flujo de la corriente.

Además, del análisis de las recomendaciones emitidas por el cuerpo colegiado CESPT-CONAGU-CEA (Mercado-Juárez, 2014) sobresalen múltiples áreas de oportunidad, administrativas y de conocimiento de las especies, *e.g.* las larvas de estos mejillones miden <200 µm, por lo que resulta extraño prohibir el uso de este estadio como carnada, se alerta de los daños debido a la densidad pero se ignora el potencial modificador del ecosistema y toxicidad química-biológica que poseen estos mejillones debido a sus hábitos filtradores y bioacumuladores. La emisión de recomendaciones debe ser apegada a la realidad de la información recabada (PNUD México, 2019c).

La presa el Carrizo tiene infestaciones en los acueductos subterráneos que se comunican con la planta de la empresa Toyota, en el medidor de gasto de 72" y tubería de 48" que alimenta a la planta Potabilizadora el Florido, así como en paredes y compuertas de la obra de toma (ZETA, 2014). Lo anterior derivó en el mal funcionamiento del medidor y el cierre de los sistemas hidráulicos a los que abastece la presa, incluyendo los más de 100 tanques de almacenamiento de agua y el corte total a la ciudad de Tijuana y Rosarito durante 3 días en noviembre del 2012 y el reemplazo de las compuertas de la obra de toma. En dichos eventos de corte de agua se exhortó de forma oficial a la población a almacenar toda el agua que pudieran y algunos planteles de educación básica suspendieron clases. En 2014, la inspección del cárcamo de Toyota, a 1.6 km de la presa El Carrizo, la cual lo abastece, mostró que sus escaleras, tuberías de comunicación y paredes estaban totalmente infestadas. Desde entonces, como única medida de control poblacional, cada 2 meses la CESPT hace limpieza con espátulas al cedazo que alimenta al cárcamo y extrae "media cubeta" de mejillones. Toyota informó que la presencia de los mejillones, sin duda alguna, afectaría la manufactura de sus productos con daños económicos catastróficos para la empresa (ZETA, 2014).

En cuanto a la potabilizadora El Florido, en 2011, se reportó el colapso de la parte superior del PULSATOR del módulo I, en donde el 80% de la cámara estaba infestada por mejillones (ZETA, 2014). En los módulos II y III de la planta se ubicó el 20% restante de la plaga. Se realizaron trabajos nocturnos y se extrajeron 9 m³ de conchas y se sustituyeron tuberías.

En 2014 CESPT y CONAGUA estimaron para estas secciones del ARCT un costo de 10 mdp por la remoción manual y cloración como medidas de control y esto sin contemplar el precio de cambiar tuberías y equipos averiados (ZETA, 2014).

El 19 de septiembre del 2019 CESPT informa mediante respuesta a la solicitud de transparencia que la planta El Florido sigue realizando labores de extracción de mejillones y que actualmente retira 25 m³ por mes, cantidad mayor a los 13 m³ cada tres meses de 2011, pero menor a los 163 m³ cada tres meses en 2014.

Los siguientes casos de estudio, de la presa el Carrizo y la planta potabilizadora El Florido, fueron planteados pese a la poca información disponible y que es de carácter anecdótica

debido a la confidencialidad de los documentos, esperando que CESPT de respuesta a la solicitud de transparencia 00949219. Mientras que El Carrizo puede ser tratado como un ambiente artificial-natural debido a la composición del ecosistema que alberga y a la importancia cultural-recreativa, la instalación de El Florido es únicamente de carácter industrial y para fines de consumo humano del agua.

8. Caso de estudio 1: presa El Carrizo

La presa El Carrizo es un vaso de agua de 238 hectáreas de inundación con capacidad extraordinaria y máxima de 37 millones de m³, con un nivel de elevación de 286.22 m. Esta presa recibe agua principalmente del Río Colorado, sin embargo, otra pequeña cantidad proviene de acuíferos y precipitaciones (García, 2018). El agua que llega por el ARCT lo hace mediante la línea de conducción “túnel dos”. Este túnel es una línea de dos tramos de tubería de concreto presforzado con junta flexible: el primero de 23.7 km y 60" de diámetro, enterrado a 2.50 m y el segundo de 15.8 km y 54" de diámetro, enterrada a 2.40 m. La cortina de la presa tiene una longitud de 305.50 m, una altura de 43 m, un ancho de corona de 8 m, la construcción es de tierra con un corazón impermeable, protegido por una zona de filtros a cada lado y cubierta con enrocamiento. Está provista de un vertedor de demasías con su respectivo canal de salida, con un flujo de 86 m³/s, pero la presa ha operado a casi la mitad de su capacidad durante la última década. El agua que la potabilizadora El Florido demanda es extraída mediante la obra de toma, la cual opera a diferentes niveles y es transferida por un acueducto de concreto presforzado de 13.6 km y 72" de diámetro. A causa de las lluvias de 1992, se construyó una línea de 48" de diámetro de hierro dúctil para reforzar la línea existente en un tramo que estaba en peligro (Fig. 6-8) (CEA, 2017; CEA, 2019; CESPT, 2019).



Obra de toma, presa El Carrizo, abril 2005



Punto de descarga del ARCT, abril 2005

Figura 6. A) Obra de toma de agua hacia la potabilizadora B) Punto de descarga del Acueducto Río Colorado-Tijuana. Fuente: [https://www.cespt.gob.mx/culturaagua/pdf/articulos/Acueductos\(03\).pdf](https://www.cespt.gob.mx/culturaagua/pdf/articulos/Acueductos(03).pdf) y <http://www.ceabc.gob.mx/documents/indicadores/CIERRE%20DE%20INDICADORES%202017.pdf>



Figura 7. Mantenimiento de una válvula reguladora de la presa El Carrizo en su línea de conducción de 48" debido a obstrucción con sólidos. Fuente: <https://verazinforma.com/estatal/dan-mantenimiento-a-presa-el-carrizo-por-falla-en-una-valvula/>



Figura 8. Obra de toma que muestra un grado importante de desecación (Google Earth, 2019), en 2017 operaba a casi la mitad del nivel de la presa.
Fuente: <http://www.ceabc.gob.mx/documents/indicadores/CIERRE%20DE%20INDICADORES%202017.pdf>.

8.1 Exposición del caso e identificación de costos y beneficios

Los efectos de la presencia del mejillón quagga en la presa El Carrizo fueron identificados como costos o beneficios, destacando si eran monetizables o no, de acuerdo a lo expuesto en la sección 3 y 4 de este documento (Tabla 5). En ocasiones como esta, los efectos que por el momento son identificados como costos de control actuales representan a su vez los **beneficios posibles** de las medidas de control propuestas como parte del manejo integrado que resulten exitosas y de adoptar estrategias de mitigación, preventivas y adaptativas para el manejo de los organismos.

Tabla 5. Costos y beneficios de la presencia del mejillón quagga en la presa El Carrizo.			
Situación	C/B o No monetizable	Efecto	Valuación
Infestación de las líneas subterráneas hacia el cárcamo Toyota, medidor de gasto 72" y ducto de 48"	Costo	Aumenta la vulnerabilidad del ARCT, el cual ha superado la vida útil de su diseño.	\$ planeación y estudio \$ pérdida de secciones infestadas \$ daños a la industria automotriz que pudieran derivar en pérdida de empleos e inversión para el estado. \$ Menor eficiencia

			\$ Costo del vaciado de la presa \$ Costo de mano de obra y de insumos para la reparación (tramos de tubería o soldadura, recubrimientos).
Infestación de diversos componentes de la obra de toma	Costo	Diseminación de organismos hacia el ARTC. Reemplazo de componentes	\$ costo de componentes nuevos para reemplazar componentes dañados \$ mano de obra \$ dictamen como fuente propágulos
Cortes del suministro de agua para las ciudades	Costo	Afectaciones generales a la seguridad hídrica de la población. Gasto extraordinario de agua por recolecta de pánico en la población. Exacerbación de los efectos de la sequía por cambio climático. Efecto psicológico negativo en la población, tanto por la carencia de información pública como por saber que el problema no está siendo tratado eficientemente.	\$ Estudio del caso
Filtración intensa y disminución de fitoplancton y zooplancton	Costo no monetizable	Disminución en servicios ecosistémicos de la presa.	\$ pérdida de ecosistemas \$ planeación y estudio del caso
Aumento de bacterias en sedimentos alrededor de las colonias de mejillones	Costo no monetizable	Formación de biofilms tóxicos. Favorecimiento de florecimientos algales nocivos	\$ Planeación y estudio del caso \$Daños a la salud humana y animal \$Pérdidas por florecimientos algales nocivos
Pseudoheces	Costo	Daños a la salud humana y de otros animales	\$ Planeación y estudio del caso \$ Remediación
Obstrucción, destrucción o corrosión de infraestructura	Costo	Baja la eficiencia operativa de la presa	\$ Mantenimiento adicional \$ Renovación anticipada de infraestructura
Destrucción de herramientas de pesca deportiva	Costo	Baja en la actividad turística	\$ Afectación económica y cultural
Daños a embarcaciones. Prohibición del uso de embarcaciones contaminadas	Costo	Aumento de mantenimiento de embarcaciones de CESPT y baja en la actividad turística	\$ mantenimiento adicional o renovación anticipada de unidades oficiales y turísticas

			\$ aumento en el uso de combustible por las bioincrustaciones \$Aumento de los costos de las actividades recreativas \$ Perdidas turísticas \$ Costo de estaciones de limpieza y monitoreo
Coloración parduzca del agua	Costo	Contaminación y cambios en la composición fisicoquímica del agua tras la muerte de los bivalvos	\$ Afectaciones a la actividad turística y deportiva \$ Medicamentos por posibles enfermedades
Prohibición de la pesca en la presa	Costo	Anulación de las actividades recreativas	\$ Perdida en las actividades recreativas
Monitoreo y control de mejillones	Costo	Aumento en carga laboral Necesidad de capacitación e implementación	\$ Planeación e implementación de control \$Costos de los métodos de control y monitoreo \$ Costos asociados a la capacitación
Modificación del valor estético por presencia y exceso de organismos vivos y muertos	Costo	Amenazas punzocortantes y biológico infecciosas para humanos	\$ Planeación y estudio del caso \$Limpieza \$Perdida turística \$ Medicamentos por posibles cortaduras \$ Demandas a los responsables de la presa
Asociación con babosas y caracoles en la destrucción de jardines	Costo	Pérdida de valor estético Efecto psicológico negativo en la población	\$ Perdidas turísticas \$Medidas de recuperación
Carencia de personal capacitado y protocolos para manejar la situación	Costo	Maximización de daños por no aplicar protocolo de respuesta rápida	\$ Planeación \$Normatividad \$Capacitación
Incremento del uso de sustancias químicas	Costo	Daños colaterales a la salud humana y de los ecosistemas	\$ costo de los químicos \$ Medidas de manejo \$ Medicamentos por posibles enfermedades
Control de pH en punto de aplicación de reactivos	Costo	Adición de más químicos	\$ costos de medidas e implementación de las mismas \$ Medicamentos por posibles enfermedades

8.2. Propuesta de método de control

Como fue mencionado anteriormente se requiere de la combinación de métodos diversos, aplicados de manera localizada en la presa El Carrizo. Se considera desconocida la vía física de ingreso de los mejillones y se reconoce la presencia en las salidas y entradas de agua de la presa. Se recomienda establecer y coordinar las acciones de monitoreo con la calendarización del mantenimiento rutinario preestablecido por la CESPT con objeto de disminuir costos. Además, presentarlas junto con el diseño de implementación de los métodos de control utilizando la herramienta de diagrama de Gantt (PNUD México, 2019^b).

8.3 Contención y recuperación de mejillones

Primeramente, sería necesario determinar si es posible la cuarentena total o parcial de la presa con calendarización de desecamiento e instalación de un sistema de cribado en tándem para sólidos (Fig. 10). Este sistema consta de mallas colocadas en las entradas y salidas de la presa y tiene 4 objetivos operativos:

- 1) disminuir o controlar el problema de obstrucción de las tuberías por sólidos en el flujo de agua,
- 2) evitar la formación de sustratos colonizables que puedan derivar en propágulos,
- 3) constituir una región localizada para retirar sólidos y mejillones desprendidos, derivados de la implementación de otros métodos de control; y,
- 4) funcionar como dispositivos estratégicos para el monitoreo.

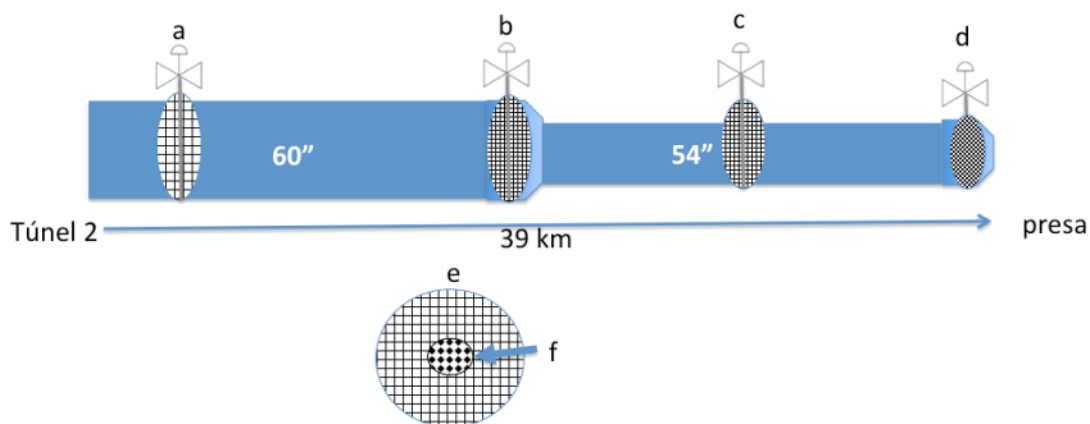


Figura 10. Ejemplo del cribado en tándem propuesto para el túnel 2. Método de contención y recuperación de conchas y sólidos para ser colocados en las entradas (líneas de 50", 54", 48" y conexión con arroyos) y salidas (línea de 72", medidor de gasto a El Florido, punto de descarga de demasías e inicio de arroyos) de la Presa El Carrizo. Las mallas de cribado estarán acopladas a las válvulas ya existentes. La luz de malla en orden

decreciente según la dirección del flujo del agua y proximidad a la presa a> b> c> d. Vista frontal de una malla, e, y superficie trampa para posible colonización de mejillones como método de monitoreo, f.

Se consideran como entradas el “ducto dos” y los acuíferos detectados en SIG (Fig. 11). Se consideran como salidas el vertedor de demasías, y su canal de desfogue hacia el Arroyo El Carrizo.



Figura 11. A) Las flechas rojas indican la dirección de los afluentes de la presa el Carrizo. B) Se encerraron en cuadros rojos los sitios más probables en los que se puede establecer el mejillón; 1. Toma de agua; 2. Cortina; 3. vertedor de demasías; 4. Arroyo El Carrizo. (Tomado de Google earth, 2019)

8.4 Celdas móviles para formación de microecosistemas temporales

Después de un estudio de campo dirigido, se seleccionarían áreas prioritarias en función de la presencia de mejillones. En estas áreas serían colocadas celdas móviles que son el resultado de acoplar ondas de radio de extremadamente baja frecuencia (Ryan, 1998) y cloración (CEA, 2017). Se mantendrían en funcionamiento en ese lugar durante 90 días y serían retiradas posteriormente. Este lapso de exposición a estrés físico y químico en un ambiente parcialmente delimitado permitirá superar los cerca de 14 días que puede durar un mejillón adulto sin filtrar como respuesta de protección a agentes químicos (PNUD México, 2019^a). Adicionalmente, las ondas de radio interfieren en el potencial dieléctrico de moléculas de calcio y membranas celulares, manteniéndolo soluble en forma de dipolo

difuso y no asimilable a nivel celular en cualquier estadio de desarrollo. Las alteraciones fisiológicas causadas son la inhibición de la asimilación del calcio, la descalcificación de las conchas que se vuelven frágiles y finalmente la muerte del organismo (Ryan, 1998). Los 90 días del *microecosistema*, el ambiente en el interior se diferenciaría del resto del vaso de agua como consecuencia de las concentraciones de NaOCl y el agua tratada por ondas de radio. La formación de microecosistemas pretende controlar la intensidad de los métodos químicos, físicos y biológicos para potenciar su eficiencia, reducir las dosis a utilizar y los posibles impactos secundarios en la flora y fauna de la presa. En cuanto al cloro, sólo es necesario mantener una dosis letal media a mínima dentro de las celdas como coadyuvante al estrés causado por las ondas de radio, cuyo uso ha sido aprobado por la US-EPA como seguro (Fig. 12-14).

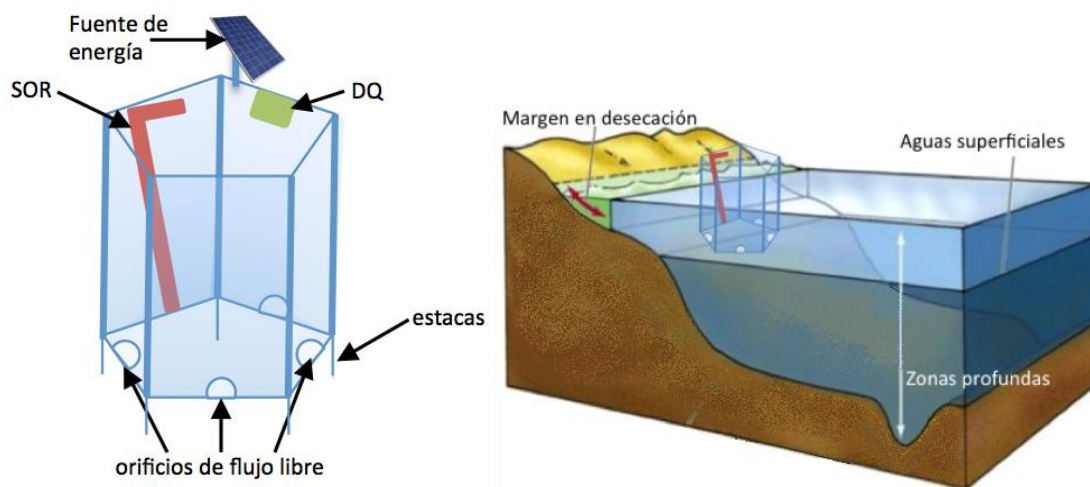


Figura 12. Microecosistema por medio de la colocación de celdas móviles para el control poblacional y erradicación localizada de los mejillones dreisénidos. De lado izquierdo se muestra la celda y sus componentes, SOR: sistema de ondas de radio; DQ: dosificador de químicos. El área del microecosistema dentro de la celda es 252.93 m², equivalentes a la superficie de una cancha de tenis, si fuera pentagonal, con posible expansión debido a los pequeños orificios de flujo libre por osmosis en el fondo. De lado derecho se ejemplifica su instalación.

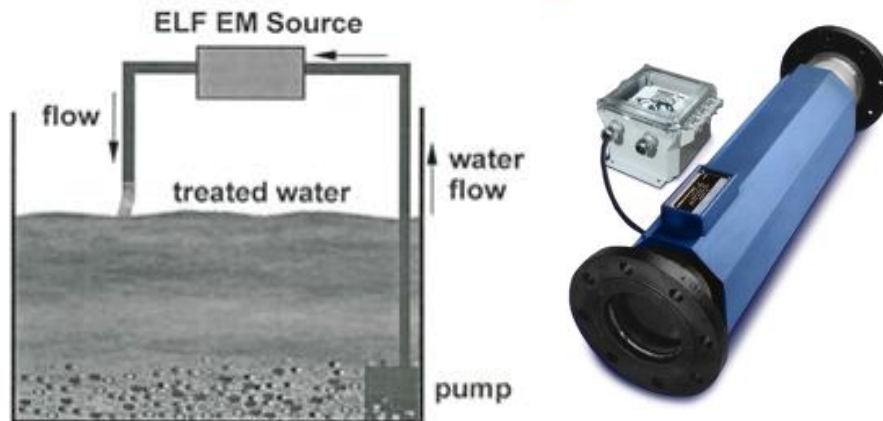


Figura 13. Esquema del sistema de ondas de radio (SOR) y su funcionamiento. El método fue desarrollado por Ryan MF (1998) (izquierda) para su patente y distribución por Ener-Tec LLC (derecha). Fuente: <https://ener-tec.com/>.



Figura 14. Funcionamiento conjunto de las medidas 2 y 3: Estrategia de microecosistemas y control. Primero se trata de poner en cuarentena, total o parcial, el área seleccionada como prioritaria. Se colocan durante 90 días las celdas en posición estratégica. Las celdas son reubicadas después de los 90 días y el área que dejan es tratada con una dosis terminal mínima de Zequanox. Se pueden realizar 4 de estos ciclos por año en toda la presa (Tomado de Google Earth, 2019).

8.5 Control biotecnológico

Transcurridos los 90 días de estrés físico y químico en los microecosistemas temporales, se espera que la población de todos los estadios de desarrollo haya disminuido y que los mejillones que sigan vivos estén severamente debilitados, aumentando su vulnerabilidad al filtrar el molusquicida *Zequanox* y mueran (Fig. 15).



Figura 15. Zequanox. Fuente: https://www.usgs.gov/centers/umesc/science/assessment-open-water-zequanox-applications-controlling-dreissenid-mussels?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects y <https://www.waterpowermagazine.com/features/featurecontrolling-invasive-mussels/featurecontrolling-invasive-mussels-436514.html>

8.6 Costos monetizables de implementación del método de control

Tabla 6. Valuación de montos en pesos mexicanos en el 2019.			
Costos	Hacer nada	Estrategia actual	Estrategia propuesta
Investigación y Desarrollo (costo fijo)	Total= 0 MXN	Desconocido	Salario de biólogos e ingenieros 2,000,000 MXN Total= 2,000,000 MXN
Gastos capitales o fijos (costo fijo)	Total= 0 MXN	Remoción manual Total= 10,000,000 MXN	125,000 MXN todas las entradas y salidas con un sistema de cribado con 4 aperturas de malla distintas 1,000,000 MXN por 8 celdas para microecosistema Monitoreo -Muestreo de plancton 392,000 MXN -Análisis de muestras = 90,000 MXN Total= 1,607,000 MXN
Suministros por periodo (costo recurrente)	Total= 0 MXN	Desconocido	NaOCl 300,000 MXN Zequanox 390,000 MXN

			<p>Traslado al relleno sanitario 52,000 MXN</p> <p>Sistema completo del total en la presa como repuestos de seguridad teóricos 10,000 MXN</p> <p>Total= 752,000 MXN</p>
Trabajo (costo recurrente)	Total= 0 MXN	Desconocido	<p>240,000 MXN para salario de 2 trabajadores de base extras en CESPT. Acoplados a labores de mantenimiento rutinarias de CESPT</p> <p>Total= 240,000 MXN</p>
Mantenimiento (costo recurrente)	Total= 0 MXN	<p>Reemplazo y mantenimiento de infraestructura</p> <p>Total= 9,000,000 MXN</p>	<p>125,000 MXN por una celda como medida preventiva</p> <p>Total= 125,000 MXN</p>
<i>Implementación inicial</i>	0	10,000,000 MXN	<p>Investigación y Desarrollo + Gastos capitales o fijos:</p> <p>2,000,000 + 1,607,000 = 3,607,000 MXN</p>
<i>Costos recurrentes</i>	0	9,000,000 MXN	<p>Suministros por periodos + trabajo + mantenimiento:</p> <p>752,000 + 240,000 + 125,000 = 1,117,000 MXN</p>

8.7 Beneficios de implementar el método de control

Brown y Daigneault (2015) proponen la valuación de los beneficios en tres categorías. Como se mencionó anteriormente (sección 2 y 3 del presente reporte), se requiere de la implementación real de herramientas para el estudio socioeconómico que permita asignarle cifras a cada situación y efecto (sección 7 del presente reporte) de la presencia de los mejillones en la presa el Carrizo, pero también a nivel estatal y nacional (Tabla 7).

Tabla 7. Valuación de beneficios según Brown y Daigneault (2015).			
Beneficio del manejo	Hacer nada	Estrategia actual (remoción manual)	Estrategia propuesta
Costos evitados (Costos variables en el tiempo)	0	\$ / periodo	\$ / periodo
Economía/ Salud	0	\$ / por periodo	\$ / por periodo

No monetizables, psicológicos, culturales	0	?	?
---	---	---	---

En el mismo sentido, los beneficios pueden ser referidos como el valor de evitar las pérdidas generadas por la infestación. Los beneficios son siempre crecientes si se considera que las medidas de control son exitosas. De modo que nos basaremos en los hechos reportados para plantear supuestos que nos permitan seguir con el análisis costo-beneficio partiendo de las estimaciones económicas reportadas por CESPT-CONAGUA-CEA entre 2013 y 2014 (Mercado-Juárez, 2014; ZETA, 2014):

Supuesto 1: Debido a que el único dato que se tiene es el gasto de 38 mdp entre la presa y la planta potabilizadora, se consideraron 19 mdp como daños totales en 2014 para El Carrizo y 19 mdp como daños totales en 2014 para El Florido.

Supuesto 2: El Carrizo tuvo gastos totales de 10 mdp por raspado y recuperación de las conchas de mejillón, el cual sería un costo anual y 9 mdp por el reemplazo de compuertas en la obra de toma y cambio en líneas de conducción solo contemplado al inicio.

Supuesto 3: Una vez que se hicieron las reparaciones, se mantuvo la implementación del método de raspado y remoción manual.

Supuesto 4: Dada la falta de valuación socioeconómica, supondremos que el beneficio total de no tener a los mejillones era 38 mdp en 2014 (19 mdp para cada uno).

De modo que, para El Carrizo, 19 mdp a su vez podrían haber sido considerados como los beneficios de haber implementado los métodos de control, si hubieran sido exitosos. Además de esto faltaría incorporar el componente macroeconómico de la inflación, así como la valoración del impacto indirecto en el bienestar social para acercar a la realidad el valor total de los beneficios, que son explicados en los siguientes apartados.

8.8 Costos y beneficios en el tiempo, beneficio neto y descuento

Han transcurrido 5 años desde el primer dictamen colegiado de CESPT-CONAGUA-CEA y aún no existe información pública que permita medir la evolución de la situación en pesos. Corresponde en esta fase del análisis hacer las comparaciones evolutivas de los costos y beneficios que bien podrían ser, el valor de no haber implementado ninguna estrategia de control, evaluar las que fueron implementadas y las propuestas, así como su evolución monetaria en 5 y 10 años. Esta información es de gran valor para propósitos de manejo del presupuesto para el buen funcionamiento del ARTC, así como para seguridad hídrica y buen gobierno del estado.

El poder adquisitivo de 1 peso actual puede ser menor o mayor en el futuro. Esto se refleja en el beneficio neto al ser afectado por externalidades como cambios de preferencias, condiciones de riesgo, inflación, etc. De aquí que el manejo de la información deba ser tal que permita hacer comparaciones considerando el impacto de estas externalidades, para lo cual se recomienda calcular el descuento. El descuento consiste en establecer las condiciones para valorar en el presente algo en el futuro. Para este propósito, el Banco Mundial propone que el cálculo para México se haga con tasas de interés del 12% y una reducción al 10% (Tabla 8).

$$VP = \frac{VF}{(1 + r)^t}$$

aquí r es la tasa de descuento.

Finalmente, el *Valor Presente Neto* es el valor presente de los beneficios menos el valor presente de los costos:

$$VPN = VP_{beneficios} - VP_{costos}$$

Por esta razón, en algunas ocasiones, proyectos con costos iniciales altos y beneficios distantes y lejanos resultan poco atractivos.

Con esta información, se puede calcular el beneficio neto de haber implementado las medidas y su evolución en el tiempo considerando la siguiente fórmula:

$$\frac{\text{Beneficio acumulado}}{\text{Costo acumulado}} = \text{Tasa de Beneficio/Costo}$$

Tabla 8. Resumen del análisis costo-beneficio para el control del mejillón quagga en la presa El Carrizo de acuerdo con la estrategia de control propuesta.				
	Valor presente Costo (mdp)	Valor presente Beneficio (mdp)	Valor presente neto (mdp)	Tasa Beneficio/Costo
Hacer nada	0	0	0	0
10 años	10.84	60.83	49.98	5.61
*Se utiliza una tasa de descuento del 12%				

9. Caso de estudio 2: planta potabilizadora El Florido

La planta El Florido tiene la capacidad de potabilizar 4,000 L/s en dos módulos de tratamiento de 2,000 L/s. El módulo dos sólo tiene filtros, esto debido a la baja turbiedad del influente. Esta planta está constituida de acuerdo con la tecnología DEGREMONT en la cual son añadidos productos químicos floculantes, clarificación en la unidad llamada pulsador y filtración rápida. Están previstas también etapas de pre y post cloración. En septiembre de 1982 inició su operación con el primer módulo de una capacidad de 2 m³/s y en mayo de 1992 se integró el segundo módulo al sistema, con lo que su capacidad total se incrementó a 4m³/s con lo cual cubre el gasto de diseño del Acueducto hasta los centros de consumo de la población (Fig. 16) (CESPT, 2019).



Figura 16. Tanque de filtración, potabilizadora El Florido. Fuente: [https://www.cespt.gob.mx/culturaagua/pdf/articulos/Acueductos\(03\).pdf](https://www.cespt.gob.mx/culturaagua/pdf/articulos/Acueductos(03).pdf)

La Potabilizadora “El Florido” también recibe suministro de la “Presa Abelardo L. Rodríguez” mediante tubería de acero de 1,067 mm (42”) de diámetro con una longitud de 0.788 km hasta llegar a la planta de bombeo “PB-6”, la cual entra en función cuando el nivel del agua en la presa no vence la carga neta positiva en la succión para satisfacer el gasto de diseño. La descarga de los equipos principales está conectada al múltiple de descarga y continúa con una línea de impulsión de acero de 1,220 mm (48”) de diámetro con una longitud de 0.323 km, después cambia a tubería de hierro dúctil clase K9 de 1,220 mm (48”) de diámetro y una longitud de 8.17 km para llegar a la potabilizadora “El Florido”.

9.1 Exposición del caso de identificación de costos y beneficios

Tabla 9. Costos y beneficios de la presencia del mejillón quagga en la presa El Carrizo.			
Situación	C/B o No monetizable	Efecto	Valuación
Filtración intensa	Beneficio	Clarificación de la unidad de pretratamiento	\$ Valorar el posible beneficio
Infestación de mejillones en la unidad pulsator, incrustados en el 90% de la superficie	Costo	Colapso de la cámara superior del pulsator por la acumulación de biomasa	\$ Costo de limpieza y sustitución de componentes del pulsator
Presencia de mejillones en la unidad de filtración rápida	Costo	Disminución de la eficiencia de filtración, limpieza de la cámara y sustitución de filtros.	\$ Limpieza \$ Reemplazo de filtros \$ Asesoría extra
Presencia de mejillones en la unidad de filtración directa	Costo	Disminución de la eficiencia de filtración, limpieza de la cámara y sustitución de filtros.	\$ Limpieza \$ Reemplazo de filtros \$ Asesoría extra
Daños en infraestructura	Costo	Reducción de diámetro inferior de los ductos, disminución de flujo de agua, taponamiento, corrosión, bloqueo, desequilibrio en el flujo, tanto en tuberías de captación y distribución, como en compuertas, rejas de desbaste, tuberías y válvulas, estaciones de bombeo, filtros, medidores de flujo y nivel, embalses, depósitos de captación y almacenamiento posterior	\$ Limpieza \$ Remoción de cadáveres \$ Reemplazo de tuberías \$ Trabajo/mano de obra extra
Corte de suministro de agua para las ciudades	Costo	Afectaciones generales a la seguridad hídrica de la población. Gasto extraordinario de agua por recolecta de pánico, causando posibles daños a la salud por focos de infección. Exacerbación de efectos de la sequía	\$ Estudio de caso

		por cambio climático. Efecto psicológico negativo en la población por la cadencia de información pública.	
Cambio en la composición bacteriana alrededor de las colonias de mejillones	Costo	Formación de biofilms tóxicos y florecimientos algales nocivos.	\$ Planeación y estudio del caso \$ Daños a la salud \$ Modificación de los procesos de purificación
Acumulación de pseudoheces	Costo	Cambios en la carga de sólidos, composición química y dureza del agua.	\$ Estudio del caso \$ Rediseño del proceso de potabilización \$ Suplementos extra del diseño de potabilización
Monitoreo y control de mejillones	Costo	Aumento en la carga laboral y capacitación	\$ Planeación del método \$ Costos del método
Carencia de personal capacitado y protocolos para manejar la situación	Costo	Maximización de daño por no aplicar protocolos de respuesta rápida	\$ Planeación \$ Capacitación \$ Normatividad \$ Asesoría
Incremento del uso de sustancias químicas	Costo	Necesidad de rediseñar el proceso de potabilización	\$ Costos de los químicos \$ Medidas de manejo \$ Remoción de los químicos
Labores extra (Remoción de mejillones)	Costo	Corte de suministro de agua. Cuarentena de las unidades a limpiar.	\$ Pago extra \$ Contrataciones \$ Estudio económico del efecto del corte del agua

9.2. Propuesta de método de control

Similar a la presa El Carrizo, para El Florido, se propone una estrategia de métodos acoplados con los cuales se asegura que no existirá riesgo para la salud humana. Como ya se mencionó, el problema de la invasión de los mejillones se presenta principalmente en el pulsador, en el cual se ha encontrado del 80 – 90% de los organismos, por lo que se propone una especial atención a este. El otro 20 -10% se encuentra distribuido en el resto de la planta, especialmente en las unidades de filtración (Fig. 17).

Revestimiento anti-adhesivo: Se recomienda cubrir las paredes y propelas de la unidad de pretratamiento, así como en las superficies susceptibles de la unidad pulsador.

Choques térmicos: Se propone diseñar un sistema que cause cambios térmicos bruscos, aumentando la temperatura hasta 70 grados. Este sistema debería abarcar la unidad de pretratamiento y las unidades filtración rápida y directa.

Iones de cobre: por las dimensiones de la planta El Florido, se recomendó colocar dos generadores de iones de cobre *Macrotech*, los cuales se localizarían uno en la entrada del pulsator y el otro en la salida hacia las unidades de filtración. Cada generador consta de seis celdas de ánodos de cobre los cuales deberán ser remplazados anualmente (Comunicación personal William Blume, 2019).

Monitoreo: Establecer un sistema de monitoreo basado en el uso de bioboxes (PNUD México, 2019^c). Estos sistemas deberán ser colocados en cada tubería que conecte una unidad del sistema de potabilización a otra y en la salida a la distribución.

Remoción de cadáveres: Previo a la implementación de la estrategia se requerirá remover los mejillones y retirarlos de la planta, para lo cual se necesitará mano de obra extra, así como un servicio de transporte para trasladarlo al relleno sanitario.

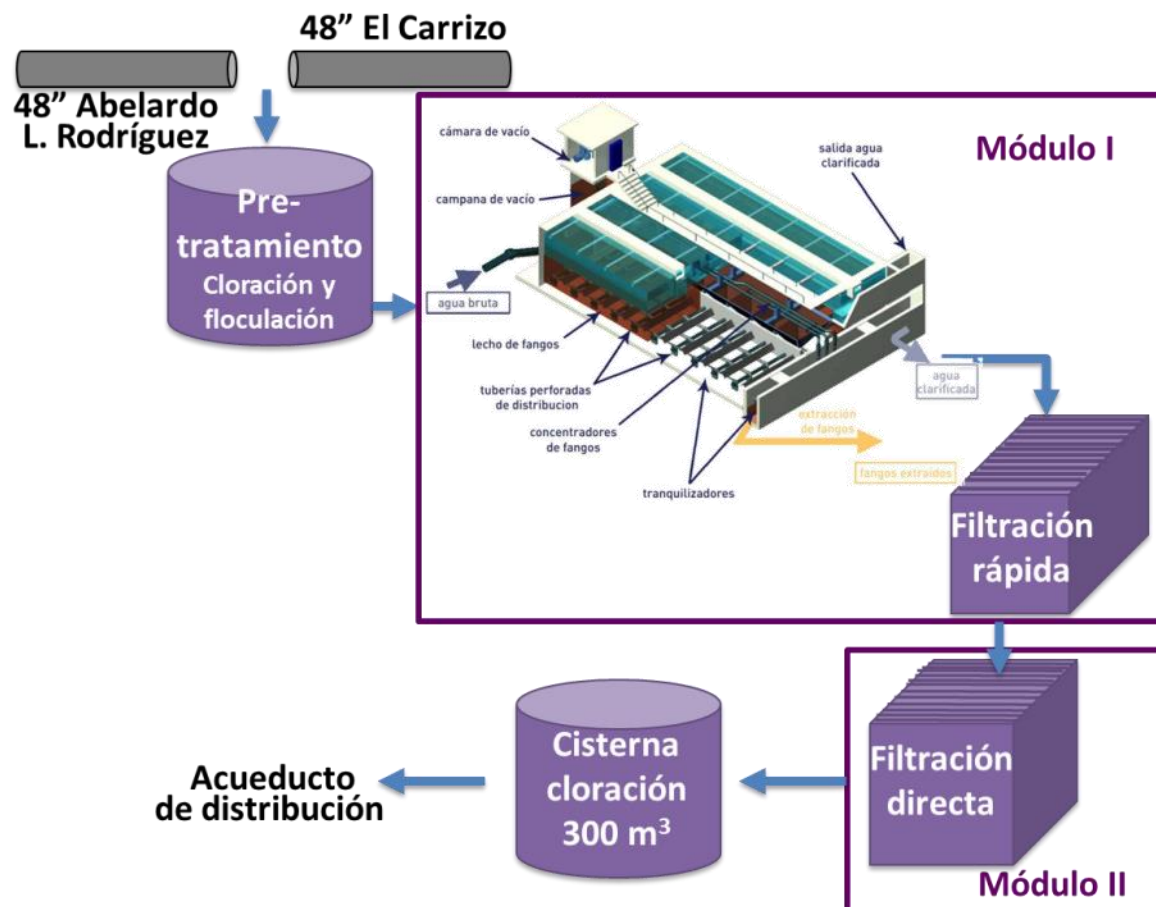


Figura 17. Esquematización de la planta potabilizadora El Florido. Fuente: Pulsator tomado de www.Degremont.es

9.3 Costos monetizables de implementación del método de control

Tabla 10. Valuación de montos en pesos mexicanos en el 2019.			
Costos	Hacer nada	Estrategia actual	Estrategia propuesta
Investigación y Desarrollo (costo fijo)	Total= 0 MXN	Desconocido	Salario del biólogo e ingeniero de diseño 2,000,000 MXN Trabajo de investigación 1,000,000 MXN Equipo y suministros 1,338,000 MXN Total= 4,338,000 MXN
Gastos capitales o fijos (costo fijo)	Total= 0 MXN	Desconocido	Sistema de Choque térmico 20,000 MXN Bioboxes 15,000 MXN Generador de iones de cobre 6,459,000 MXN Total= 6,494,000 MXN
Suministros por periodo (costo recurrente)	Total= 0 MXN	Desconocido	Pintura para el revestimiento 2,000,000 MXN Traslado al relleno sanitario 52,000 MXN Energía para el choque térmico 340,000 MXN Total= 2,392,000 MXN
Trabajo (costo recurrente)	Total= 0 MXN	Remoción manual Total= 10,000,000 MXN	Recubrimiento 360,000 MXN Remoción de mejillones 240,000 MXN Total= 600,000 MXN
Mantenimiento (costo recurrente)	Total= 0 MXN	Reemplazo y mantenimiento de infraestructura Total= 9,000,000 MXN	Celdas (ánodos de cobre) 1,330,000 MXN Total= 1,330,000 MXN

<i>Implementación inicial</i>	0	0 MXN	Investigación y Desarrollo + Gastos capitales o fijos: 4,338,000 + 6,494,000 = 10,832,000 MXN
<i>Costo recurrente</i>	0	19,000,000 MXN	Suministros por periodos + trabajo + mantenimiento: 2,392,000 + 600,000 + 1,330,000 = 4,322,000 MXN

9.4 Costos y beneficios en el tiempo, beneficio neto y descuento

Para el análisis costo-beneficio para la planta El Florido se utilizó el mismo método que para la presa El Carrizo. En la siguiente tabla es presentado el resumen de las operaciones y se muestra el beneficio obtenido por la aplicación de la estrategia propuesta (Tabla 11).

Tabla 11. Resumen del análisis costo-beneficio para el control del mejillón quagga en la planta potabilizadora El Florido de acuerdo con la estrategia de control propuesta.				
	Valor presente Costo (mdp)	Valor presente Beneficio (mdp)	Valor presente neto (mdp)	Tasa Beneficio/Costo neto
Hacer nada	0	0	0	0
10 años	35.72	60.83	25.12	1.70
*Se utiliza una tasa de descuento del 12%				

10. Recomendaciones finales para el manejo integrado de las especies

En el presente estudio fueron analizados dos de los componentes del ARCT, demostrando que la implementación de estrategias de control oportunas representa un beneficio económico. Se recomienda que, tanto la selección de las estrategias como el análisis costo-beneficio, se realicen con el mayor apego a la realidad, lo que evita la necesidad de basarse en supuestos, y esto se logra con una mayor disponibilidad de información respecto al ambiente, la especie y datos socioeconómicos.

Las estrategias propuestas en este documento resultarían benéficas para el control de los mejillones, con un beneficio neto de 25.12 mdp para la planta potabilizadora El Florido y de 49.98 mdp para la presa El Carrizo. Aunque la documentación de la infestación por

mejillones en el ARCT está clasificada como confidencial y aún falta hacer el trabajo de campo para coleccionar correctamente los datos poblacionales y de dinámica ecológica en los componentes del ARCT, los beneficios podrían ser mayores, ya que por ejemplo, no fueron considerados los costos socioeconómicos de la suspensión del suministro de agua, ni afectaciones a actividades recreativas.

Debido a que se desconocen los beneficios monetizables del método de control actual (remoción manual), es decir las pérdidas económicas que resultarían por el desabasto de agua en caso no controlar la infestación, no fue posible realizar los cálculos para el análisis de costo-beneficio para éste. Por lo cual estos costos fueron considerados como beneficios de la estrategia de control propuesta. Calcular estos beneficios implicaría realizar un estudio más a fondo para conocer el impacto de dicho desabasto de agua sobre la población y las empresas que dependen de ello y el grado con el cual se reduciría el abasto de agua en caso de continuar la infestación de forma no controlada.

Los diversos estudios sobre los impactos económicos de las especies exóticas invasoras difieren en cuanto a ubicación y escala (Lovell *et al.*, 2006), por lo cual es difícil comparar directamente con trabajos anteriores. No obstante, se pueden destacar diversos estudios previos relativos a los mejillones cebra y quagga. Por ejemplo, en los Grandes Lagos, en un periodo de 10 años (1990-2000), E.E. U.U. gastó un total de US\$ 6.5 billones por los impactos del mejillón cebra, una cantidad mucho mayor a los 121.66 mdp (suma de los beneficios de la planta y la presa durante 10 años) (Lovell *et al.*, 2006). Por otra parte, para obtener beneficio de las estrategias de control implementadas en un lago con una planta generadora de electricidad (Leung *et al.*, 2002), que podríamos considerar un ambiente complejo como el ARCT, estas deberían tener un costo de US\$ 324,000 por año, que en 10 años equivaldría a US\$ 3.24 millones (aproximadamente 61.8 mdp), siendo un gasto superior al requerido para las estrategias propuestas para la presa y la potabilizadora en el presente estudio (46.55 mdp). En un estudio distinto, Thomas (2010) reporta que el costo de la prevención de la introducción del mejillón quagga a un cuerpo de agua del sistema Colorado-Big Thompson excede los beneficios generados, aunque bajo ciertos escenarios la tasa de beneficio-costos es mayor a 1. En particular se ha encontrado que en el caso del

mejillón cebra la tasa de beneficio-costo es mayor cuando se considera la prevención de su establecimiento, siendo menor en erradicaciones tempranas y disminuyendo aún más baja en una fase avanzada de la invasión (Lee *et al.*, 2007).

El refinamiento de los resultados encontrados en este análisis podrá lograrse hasta recabar información del comportamiento de la especie en el ARCT, tal como: capacidad de carga del sistema y dinámica de crecimiento poblacional. De modo que se podría valorar en términos monetarios el crecimiento de las poblaciones de mejillones respecto a las medidas de control emprendidas. Así mismo, como resultado del estudio de las interacciones ecológicas que hayan establecido los mejillones, se podrá determinar la libertad con la cual es posible llevar acabo las acciones correspondientes (PNUD México, 2019b).

La carencia de esta información y la implementación de medidas alejadas del estudio de su biología ha resultado en el no control de las poblaciones, pese a que los esfuerzos se siguen intensificando. Solo por mencionar las únicas cifras poblacionales conocidas en El Florido, en 2011 se pensaba como infestación máxima la remoción de 13 m³ de mejillones cada 3 meses, mientras que el 2019 en respuesta a la solicitud de acceso y transparencia a la información 00949219 CESPT refiere que actualmente remueven 25m³ de mejillones por mes. Dudamos de la existencia de un estudio ecológico-poblacional de la infestación por mejillones en el ARCT y si existe no ha sido proporcionado y es de suma importancia para mejorar el análisis de costos.

Referencias

- Bobeldke, A. M., Bossenbroek, J. M. Evans-White, M. A., Lodge, D. M. & Lamberti, G.A.** 2005. Secondary spread of zebra mussels (*Dreissena polymorpha*) in coupled lake-stream systems. *Ecoscience*. 12 (3): 339-346.
- Brown, P. y Daigneault, A.** 2014. Cost–benefit analysis of managing the invasive African tulip tree (*Spathodea campanulata*) in the pacific. *Environmental Science & Policy*. 39: 65-76.
- Brown, P. & Daigneault, A.** 2015. Steps in conducting a CBA. Landcare Research New Zealand Limited.
- CEA.** 2017. Informe mensual, diciembre 2017. Indicadores de gestión. [Información en línea] Disponible en: <http://www.ceabc.gob.mx/documents/indicadores/CIERRE%20DE%20INDICADORES%202017.pdf>
- CEA.** 2019. Acueducto Río Colorado Tijuana. [Información en línea] Disponible en: <http://www.cea.gob.mx/arct.html>
- CESPT.** 2019. Historia de Acueductos en Tijuana y Playas de Rosarito [Información en línea] Disponible en: https://www.cespt.gob.mx/culturaagua/preguntas_fuentes.html
- CONAGUA.** 2018. Sistema Nacional de información del agua. <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=riosPrincipales>
- De Groot, R., Brander, L., Van Der Ploeg, S., Costanza, R., Bernard, F., Braat, L., Christie, M., Crossman, N., Ghermandi, A., Hein, L., Hussain, S., Kumar, P., McVittie, A., Portela, R., Rodriguez, L.C., ten Brink, P., & van Beukering, P.** 2012. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem services*. 1 (1): 50-61.
- García, Y.** 2018. Dan mantenimiento a presa El Carrizo por falla en válvula. *Veraz Baja California*. Publicado el 26 de febrero de 2018. <https://verazinforma.com/estatal/dan-mantenimiento-a-presa-el-carrizo-por-falla-en-una-valvula/>
- Google Earth.** 2019. El globo terráqueo más detallado del mundo. <https://www.google.com/intl/es-419/earth/>
- Grizzetti, B., Lanzanova, D., Liqueste, C., Reynaud, A. & Cardoso, A. C.** 2016. Assessing water ecosystem services for water resource management. *Environmental Science & Policy*. 61: 194-203.
- Lee, D. J., Adams, D. C. & Rossi, F. J.** 2008. **The Economic Impact of Zebra Mussels in Florida.** University of Florida IFAS Extension.
- Leung, B., Lodge, D. M., Finnoff, D., Shogren, J. F., Lewis, M. A. & Lamberti, G.** 2002. An ounce of prevention or a pound of cure: bioeconomic risk analysis of invasive species. *Proc. R. Soc. Lond. B* 269: 2407-2413. DOI 10.1098/rspb.2002.2179.
- Lovell, S. J., Stone, S. F. & Fernández, L.** 2006. The economic impacts of aquatic invasive species: A review of the literatura. *Agricultural and Resource Economics Review* 35(1): 195-208.
- Mercado-Juárez, I.** 2014. Plaga en la potabilizadora de la CESPT. *Periódico Zeta*. Publicado el 9 de julio, 2014. <http://zetatijuana.com/2014/07/plaga-en-potabilizadora-de-la-cespt/>

- Peba-Ocampo, R.** 2018. El capitalismo verde: la nueva geografía del despojo. Ojarasca, La Jornada <http://ojarasca.jornada.com.mx/2018/01/12/el-capitalismo-verde-la-nueva-geografia-del-despojo-7766.html>
- PNUD México (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo).** 2019^a. Primer informe parcial: Reporte de los aspectos biológicos, ecológicos y la invasión del mejillón cebra (*Dreissena polymorpha*) y quagga (*D. bugensis*). Proyecto 083999 “Aumentar las Capacidades Nacionales para el Manejo de las Especies Exóticas Invasoras (EEI) a través de la Implementación de la Estrategia Nacional de EEI”. Mendoza, R., Luna, S., Rojo-Ramos, I., Sánchez, F., Medina-Arellano, E. Laboratorio de Ecofisiología, U.A.N.L., San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. 168 pp.
- PNUD México (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo).** 2019^b. Segundo informe parcial: Análisis de riesgo para el mejillón cebra (*Dreissena polymorpha*) y el mejillón quagga (*D. bugensis*) en México. Proyecto 083999 “Aumentar las Capacidades Nacionales para el Manejo de las Especies Exóticas Invasoras (EEI) a través de la Implementación de la Estrategia Nacional de EEI”. Mendoza, R., Luna, S., Rojo-Ramos, I., Sánchez, F., Medina-Arellano, E. Laboratorio de Ecofisiología, U.A.N.L., San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. 117 pp.
- PNUD México (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo).** 2019^c. Tercer informe parcial: Detección Temprana y Respuesta Rápida para el control y erradicación del mejillón cebra (*Dreissena polymorpha*) y el mejillón quagga (*D. bugensis*) en México. Proyecto 083999 “Aumentar las Capacidades Nacionales para el Manejo de las Especies Exóticas Invasoras (EEI) a través de la Implementación de la Estrategia Nacional de EEI”. Mendoza, R., Luna, S., Rojo-Ramos, I., Sánchez, F., Medina-Arellano, E. Laboratorio de Ecofisiología, U.A.N.L., San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. 154 pp.
- Ryan, M. F.** 1998. Extremely low frequency electromagnetism: an effective nonchemical method for control of zebra mussel infestation. *Eighth International Zebra Mussel and Other Nuisance Species Conference*, Sacramento California, Marzo 16-19, 1998 <https://ener-tec.com/learn-more/case-studies/24-low-frequency-electromagnetism-an-effective-nonchemical-method-for-control-of-zebra-mussel-infestation>
- Thomas, C. M.** 2010. A cost-benefit analysis of preventative management for zebra and quagga mussels in the Colorado-Big Thompson System [Tesis de Maestría] Department of Agricultural and Resource Economics, Colorado State University, 194 pp.
- Toledo, V. M.** 2014. ¿Capitalismo verde? *La Jornada* <https://www.jornada.com.mx/2014/02/04/opinion/018a1pol>
- ZETA.** 2014. Plaga de mejillones, ni controlada ni inofensiva. *Zeta Tijuana* Publicado en 9 de septiembre del 2014 <https://zetatijuana.com/2014/09/plaga-de-mejillones-ni-controlada-ni-inofensiva/>