



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Estudio de soluciones para el paso de peces, en la
Represa Constitución, en el Rio Negro, Uruguay.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

AUTOR/A: Sendra Morelli, Carlos

Tutor/a: Martínez Capel, Francisco

Cotutor/a: Solera Solera, Abel

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

Trabajo Fin de Máster

*Estudio de soluciones para el paso de peces,
en la Represa Constitución, en el Río Negro,
Uruguay.*

Intensificación:

ORDENACIÓN, RESTAURACIÓN Y GESTIÓN DE CUENCAS

Autor:

CARLOS SENDRA MORELLI

Tutor:

FRANCISCO MARTÍNEZ CAPEL

Cotutor/es:

ABEL SOLERA SOLERA

SEPTIEMBRE, 2022



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma



Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto
Título del TFM en español: Estudio de soluciones para el paso de peces, en la Represa Constitución, Uruguay.
Título del TFM en inglés:
Título del TFM en Valenciano: Estudi de solucions per al pas de peixos, en la Represa Constitución, al Río Negro, Uruguay.
Alumno: CARLOS SENDRA MORELLI
Tutor: FRANCISCO MARTÍNEZ CAPEL
Cotutor/es: ABEL SOLERA SOLERA
Director experimental:
Fecha de Lectura: SEP, 2022

Resumen
En español (máximo 5000 caracteres)
<p>El Río Negro drena una cuenca de 71.200km², aproximadamente un tercio de la superficie del Uruguay. Tiene una pendiente muy pequeña de 0.29% en su parte alta y 0.17% en su parte media-baja y un caudal medio diario de 1321m³/s.</p> <p>La represa hidroeléctrica Constitución puesta en servicio en 1982, es el primero de tres aprovechamientos hidroeléctricos en el Río Negro, encontrándose a 157km de la desembocadura en el Río Uruguay. Tiene un salto neto de 27.5m y su embalse es de 320km². Es la primera barrera transversal que se encuentra en el Río Negro desde la desembocadura en el río Uruguay, por lo cual disminuye drásticamente la conectividad fluvial del Río Negro con la cuenca del Plata, que incluye al Río Uruguay, Río Paraná y Río de la Plata. La misma no posee dispositivo asociado de pasaje de peces y recientes estudios concluyen que los peces migradores se extinguieron aguas arriba de la misma.</p> <p>El aumento de conocimientos de los impactos ambientales de las represas, la aceptación de que la restauración fluvial es un complemento esencial para la conservación y gestión de los recursos naturales y la creciente sensibilización, apreciación y uso de las masas de agua por parte de la</p>

ciudadanía motivan a que en este estudio se presente una propuesta de solución para el paso de peces.

En este trabajo se definirán especies de peces objetivo, para las cuales se estudiarán los requisitos necesarios para su pasaje. Se propondrán estudios para la mejora de los conocimientos de las especies de peces objetivo. Se considerarán estudio bibliográficos de la eficiencia de otros pasos de peces de la región para optimizar el diseño de la solución. Se realizará un análisis de alternativas donde se considerarán soluciones a largo plazo (retiro de la represa) y soluciones viables a corto plazo (dispositivo de paso de peces). Se diseñará y presupuestará un paso de peces, incluyendo mantenimiento y estudios de seguimiento.

En valenciano (máximo 5000 caracteres)

En inglés (máximo 5000 caracteres)

Palabras clave español (máximo 5): Restauración fluvial, paso de peces, peces migradores, ecohidráulica, Salminus brasiliensis

Palabras clave valenciano (máximo 5):

Palabras clave inglés (máximo 5): River restoration, fish pass, migratory fish, ecohydraulics, Salminus brasiliensis

Contenido

1. Introducción	1
1.1 Objetivos.....	2
1.2 Antecedentes.	2
2. Área de estudio y especies claves.	6
2.1 Climatología.	9
2.2 Geología, geomorfología y edafología.	12
2.3 Hidrografía e hidrología.	15
2.3.1 Arroyo Grande Sur.	15
2.3.2 Río Yí.....	16
2.4 Especies migradoras.	18
3. Análisis de soluciones para el paso de peces migradores.....	26
3.1 Solución 0. Retiro de la represa.....	26
3.2 Solución 1: Paso de peces del tipo <i>by-pass</i> o canal naturalizado	29
3.3 Solución 2. Paso de peces del tipo escala de escotaduras verticales.....	32
4. Diseño de paso de peces del tipo escala de escotaduras verticales.	34
4.1 Elección del ancho de ranura.	35
4.2 Altura del obstáculo.	37
4.3 Elección de la pendiente.....	38
4.4 Elección del caudal.....	39
4.5 Resultado del diseño con <i>Fish Path</i>	39
4.6 Entrada al paso de peces	42
4.7 Salida del paso de peces.....	43
4.8 Piso del paso de peces.....	46
4.9 Curvas.....	47
4.10 Compuertas de cierre, recorrido de la escala y muros de contención.	48
5. Estudio de la eficiencia de la solución propuesta.	49
5.1 Evaluación de la eficiencia del paso de peces.....	49

5.2 Evaluación de las comunidades de peces.	51
6. Presupuestos estimados.	53
6.1 Presupuesto estimado de retiro de la represa.	53
6.2 Presupuesto estimado de canal naturalizado o <i>tipo by-pass</i>	55
6.3 Presupuesto estimado de escotaduras verticales.	55
6.4 Presupuesto estimado de estudios de eficiencia.	56
7. Conclusiones.	58
8. Bibliografía.	59
9. Planos.	64

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Estacadas salmoneras en el Río Pas, España. (Fuente: Serdio, s.f.).....	3
Ilustración 2. Tipos de paso de peces. (Fuente: Marmulla et al. 2002).....	4
Ilustración 3. Paso de peces en el Río Drava. (Fuente: Mader et al. 2020).....	5
Ilustración 4. Uruguay, el Río Negro y su cuenca.....	6
Ilustración 5. Ubicación de represas del Río Negro, el Río Uruguay y el Río Paraná. (Fuente: Google Earth)	7
Ilustración 6. Esquema de la Represa de Palmar. (Fuente: U.T.E.)	8
Ilustración 7. Represa de Palmar vista desde aguas abajo. (Fuente: Google Maps).....	8
Ilustración 8. Mapa geomorfológico de Uruguay. (Fuente: Panario 1986)	13
Ilustración 9. Descripción de la pendiente de Uruguay separando en 8 distritos. (Fuente: Brazeiro A (2015)).....	14
Ilustración 10. Principales afluentes del embalse de Palmar. (Fuente: Google Earth).....	16
Ilustración 11. <i>Prochilodus lineatus</i> , Sábalo	19
Ilustración 12. <i>Leporinus obtusidens</i> , Boga.....	20
Ilustración 13. <i>Salminus brasiliensis</i> , Dorado	21

Ilustración 14. Pseudopatysyoma corruscans, Surubí	22
Ilustración 15. Luciopimelodus pati, Patí	23
Ilustración 16. Pimelodus maculatus, Bagre amarillo	24
Ilustración 17. Potamotrygon brachyura, Raya.....	25
Ilustración 18. Recorrido paso de peces del tipo bypass. (Fuente: Google Earth).....	29
Ilustración 19. Arroyo de Vera. (Fuente: Servicio Geográfico Militar)	30
Ilustración 20. Cañada de la Tapera. (Fuente: Servicio Geográfico Militar).....	31
Ilustración 21. Canal artificial. (Modificado del Servicio Geográfico Militar)	32
Ilustración 22. Nombre de las variables de diseño. Fuente Martínez et al. 2009	34
Ilustración 23. Características geométricas de los diferentes diseños de artesas. (Fuente: Puertas et al., 2012).....	35
Ilustración 25. Resultados de diseño de la escala de escotaduras verticales con Fish Path.	41
Ilustración 26. Rampa de piedras conectando la entrada del paso con el fondo del río. Fuente Marmulla et al. 2002.....	42
Ilustración 27. Represa de Palmar con ubicación del área de las turbinas	43
Ilustración 28. Compuertas regulables para variar la cota de la salida de los peces en función de la cota del embalse. Fuente Marmulla et al. 2002.	44
Ilustración 29. Resultados de diseño de Fish Path con alturas de 32,34 m, 31,48 m y 30,62 m respectivamente.....	46
Ilustración 30. Criterios de artesa en curva. (Fuente: Martínez de Azagra, 1999)	47
Ilustración 31. Izquierda: PIT Tag; derecha: Antena. (Fuente: Biomark y Profish).....	50
Ilustración 32. Distribución de receptores acústicos. (Fuente: Google Earth).....	52

Índice de tablas

Tabla 1. Climatología registrada en Mercedes en el Período 1961-1990. (Adaptado de INUMET).....	11
---	----

Tabla 2. Climatología registrada en Mercedes en el período 1991-2020. (Adaptado de INUMET).....	11
Tabla 3. Climatología registrada en Mercedes promediando ambos períodos para las variables disponibles. (Adaptado de INUMET).....	11
Tabla 4 y 5. Ventas de campo y arrendamientos para cada departamento en 2021. (Fuente: Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca)	28
Tabla 5. Características de diseño de las escotaduras verticales según distintas especies de peces. (Fuente Marmulla et al. 2002).....	36
Tabla 6. Largos promedios para distintas especies de peces. (Fuente: Marmulla et al. 2002)	37
Tabla 7. Variación del caudal con la variación del calado para el diseño de escotadura vertical elegido.	44
Tabla 8. Turner Building Cost Index. (Fuente: https://www.turnerconstruction.com/cost-index)	54
Tabla 9. Costos de retiro de la Represa de Palmar.....	54
Tabla 10. Construction Cost Index. (Fuente: Eurostat).....	55
Tabla 11. Costo de la construcción del canal naturalizado para paso de peces por Palmar.....	55
Tabla 12. Construction Cost Index (Fuente: Eurostat).....	56
Tabla 13. Primera aproximación del costo del paso de peces de escotaduras verticales....	56
Tabla 14. segunda aproximación del costo del paso de peces de escotaduras verticales...	56
Tabla 15. Presupuesto estimado de evaluación de la eficiencia del paso de peces.	57

Índice de gráficas

Gráfica 1. Ciclo medio anual de precipitación y desviación estándar en la cuenca del río Yí para el período 1981-2012. (Fuente: IMFIA, 2013).....	10
Gráfica 2. Caudales promedios mensuales del período 2009-2018 y del 2019 aforado en la ciudad de Durazno. (Fuente: MVOTMA, 2020)	17

Gráfica 3. Caudal promedio anual para los años del período 2009-2019, aforado en la ciudad de Durazno. (Fuente: MVOTMA, 2020).....	17
Gráfica 4. Cota del embalse en m.s.n.m	38
Gráfica 5. Cota del Rio Negro aguas abajo de la Represa de Palmar en m.s.n.m.....	38
Gráfica 6. Cotas del nivel del embalse del período 2000-2022, para los meses de migración.	45

1. Introducción

Las represas producen un valor económico importante y pueden facilitar una gestión adecuada de los recursos hídricos. Sus usos más frecuentes son riego, consumo humano y generación de energía eléctrica. Sin embargo, dependiendo de cómo se gestionen, pueden generar impactos ambientales significativos.

Las represas generan una notable fragmentación de la conectividad fluvial, son una barrera física para el movimiento de los peces y reducen su diversidad (Agostinho et al., 2002; Oldani et al., 2007). Generan reducciones considerables de hábitat acuático, de la biomasa tanto de los peces como de la fauna bentónica (Martínez-Capel et al., 1999). Además, la creación de reservorios por la construcción de represas hidroeléctricas, puede generar los siguientes problemas: eutrofización, incremento de la toxicidad y contaminación, sedimentación, proliferación de insectos y aumento de enfermedades con vectores acuáticos, hipolimnion anóxico, cambios en la calidad de las pesquerías, colonización por especies exóticas, tasa de reciclaje de nutrientes muy alto y sedimento tóxico, pérdida de tierra, alteración de los ciclos hidrológicos, cambios geomorfológicos del cauce aguas abajo, reducción de llanuras aluviales por regulación del caudal, pérdida de nutrientes y materia orgánica aguas abajo y obstrucción de migración de peces (Tundisi & Matsumura-Tundisi, 2003). Por estas razones, a las represas se les considera la principal causa de pérdida de integridad ecológica de los ríos (Penczak et al., 1994).

El Río Negro desemboca en el Río Uruguay. El Río Uruguay y el Río Paraná se encuentran para formar el Río de la Plata, el cual desemboca en el Océano Atlántico. La represa Constitución o de Palmar (de ahora en adelante Represa de Palmar) es la primera barrera transversal en el Río Negro, disminuyendo drásticamente sus recursos pesqueros y la conectividad de este río con la importantísima cuenca del Río de la Plata. Esta represa no posee ningún dispositivo asociado de pasaje de peces y recientes estudios concluyen que los peces migradores se extinguieron en toda la cuenca del Río Negro, aguas arriba de la misma (Ares et al., 2008; Otheguy, 2019).

Un dispositivo de paso de peces se define como cualquier estructura creada para facilitar un movimiento seguro y oportuno de los peces a través de un obstáculo (Silva et al., 2018).

1.1 Objetivos.

Los objetivos de este trabajo son:

1. Un paso efectivo de peces a través de la represa para facilitar su acceso a lugares donde históricamente estuvieron presentes las especies migradoras.
2. Plantear los estudios necesarios para el seguimiento de la solución propuesta, considerando los efectos de la solución a corto plazo, es decir la eficiencia del paso de peces, y a medio-largo plazo, los cambios en las poblaciones objetivo en la cuenca hidrográfica aguas arriba de la represa de Palmar. Este segundo objetivo debería determinar, si a futuro se consiguen recuperar las poblaciones que se han declarado extintas localmente, aguas arriba de la presa.

Para el cumplimiento de los objetivos es necesario conocer en profundidad la zona de estudio, fundamentar las elecciones de paso de peces, conocer detalladamente la hidrodinámica de dichas soluciones, así como los hábitos y capacidades natatorias de los peces presentes.

1.2 Antecedentes.

En el año 1500, en China, se documenta la necesidad de paso de peces hacia aguas arriba. En el siglo XVII, en Francia, se construyen los primeros pasos de peces rústicos compuestos de ramas y troncos para generar saltos y que los peces pasen las barreras. En el año 1678, en España en el Río Pas, se registraron pleitos por derechos de pesca debido a la implementación de estacadas salmoneras (ilustración 1). En el año 1837, Richard McFarlan patenta un paso de peces para solventar aserraderos de madera en New Brunswick, Canadá. En el año 1880, en Rhode Island, Estados Unidos, se construye la primera escala de peces para generar pasaje de peces en la Presa de Pawtuxet Falls. En el año 1910, Denil un ingeniero civil belga, desarrolla el primer paso de peces de escala de ralentizadores o Denil (García de Leaniz & De la Fuente, 2018). En el año 1945, se construye en el Río Fraser, de la Columbia Británica, en Canadá, el primer paso de peces del tipo escotaduras verticales (Evenden, 2000).

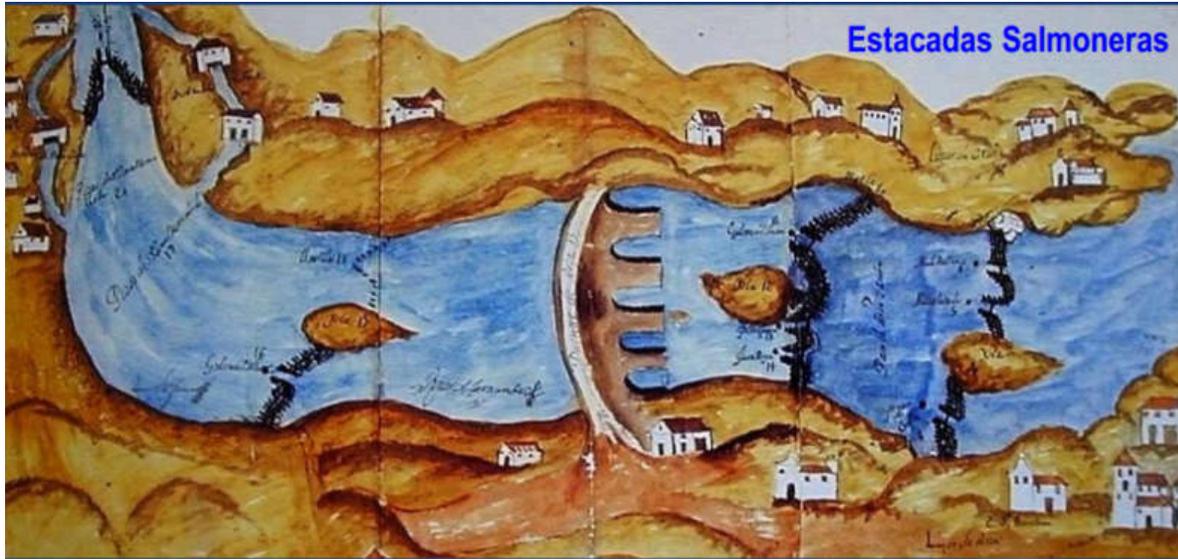


Ilustración 1. Estacadas salmoneras en el Río Pas, España. (Fuente: Serdio, s.f.)

En la actualidad, existen varios tipos de dispositivos para el paso de peces que se adaptan a distintas especies, barreras y estados de conocimiento al ser construidos. Se pueden clasificar según su funcionamiento en dispositivos discontinuos y dispositivos continuos. Dentro de los dispositivos discontinuos se encuentran los sistemas de captura y transporte de peces: los ascensores (ilustración 2, figura H) y las esclusas para peces (ilustración 2, figura G). En los dispositivos de funcionamiento continuo, tenemos los ríos artificiales o *by pass* (ilustración 2, figura B), rampas o canales adosados (ilustración 2, figura C), escalas Denil (ilustración 2, figura F) y escalas de estanques sucesivos. Las escalas de estanques sucesivos, se subdividen en pasos de tabiques vertientes, de tabiques con escotaduras y orificios sumergidos (ilustración 2, figura E) y de escotaduras verticales (ilustración 2, figura D) (Aramburu et al., 2016).

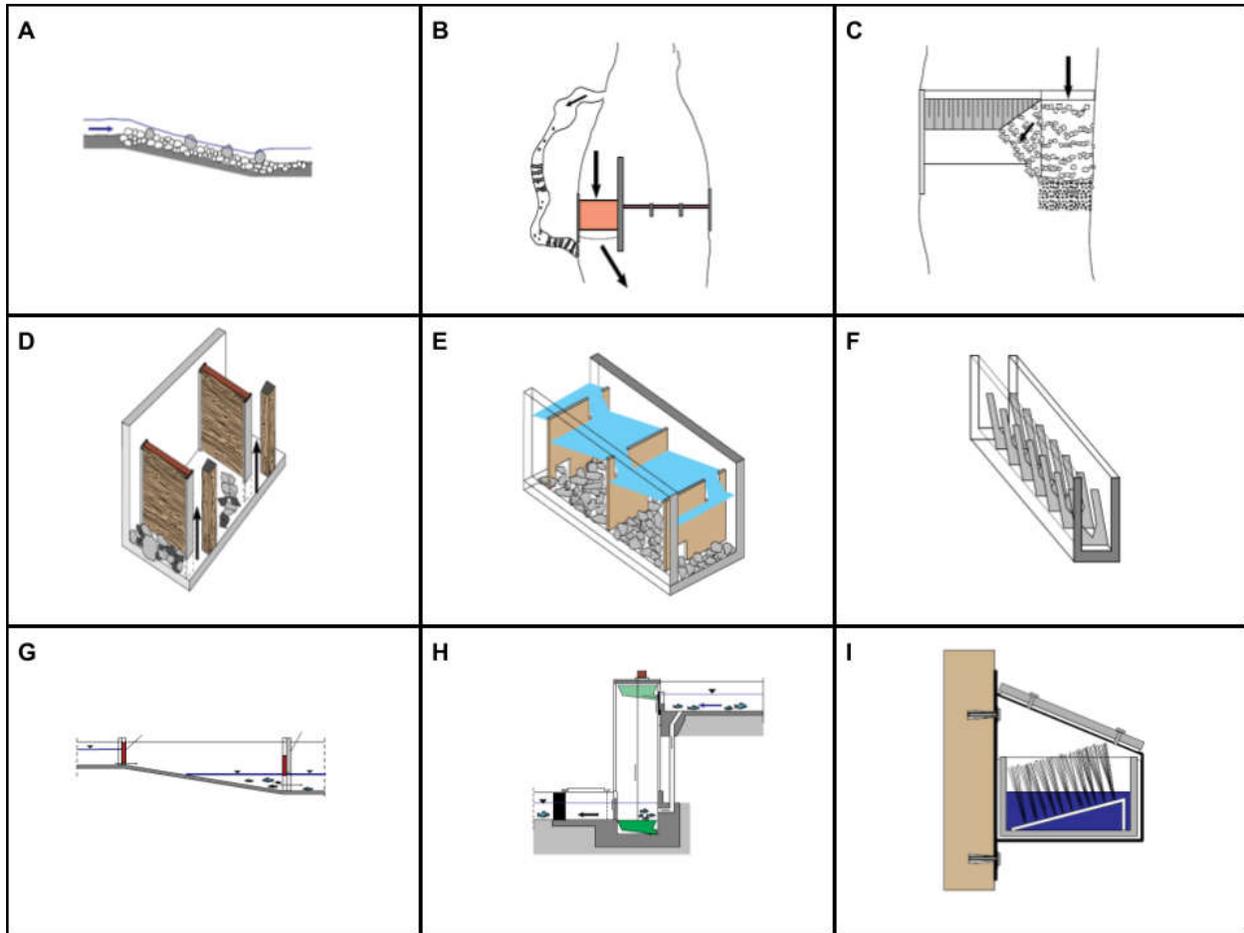


Ilustración 2. Tipos de paso de peces. (Fuente: Marmulla et al. 2002)

Bunt et al. (2016), realizaron un metaanálisis donde analizan 81 pasos de peces en funcionamiento en Europa y Norte América y su eficiencia. De los 81 paso de peces analizados, 28 son del tipo escala de estanques sucesivos, 25 son del tipo de escalas de escotaduras verticales, 7 son del tipo Denil y 21 son del tipo ríos artificiales.

En 2015, en la central hidroeléctrica Schwabeck Hydro Power en el Río Drava en Austria, se construyó un paso de peces de escotaduras verticales de 20,5 m de altura, el más alto de Europa hasta la fecha. Tiene un largo total de 550 m, 158 piscinas y 22 zonas de descanso (Ilustración 3).



Ilustración 3. Paso de peces en el Río Drava. (Fuente: Mader et al. 2020)

En Sudamérica, hasta 1998 habían 979 represas, de las cuales Lira et al., (2017) identifican 25 con dispositivo asociado de paso de peces. 4 de estos del tipo ascensor, 5 del tipo de tabiques vertientes, 10 de tabiques con escotaduras y orificios sumergidos, 3 del tipo río artificial, 2 del tipo escotaduras verticales y uno del tipo esclusas, el único paso de peces en Uruguay, instalado en la Represa binacional de Salto Grande (Uruguay-Argentina).

2. Área de estudio y especies claves.

El Río Negro drena una cuenca de 71.200 km², más de un tercio de la superficie del Uruguay. Tiene una longitud total de 850 km, de los cuales 700 km son en Uruguay y el resto en el sur de Brasil. Tiene una pendiente de 0,029% en su parte alta y 0,017% en su parte media-baja y un caudal medio de 1.321 m³ s⁻¹, medido en su parte baja, en la ciudad de Mercedes (Mallo et al., 2020). Alberga más de 100 especies de peces, la mayoría perteneciendo a los órdenes Characiformes y Siluriformes (Serra et al., 2014).

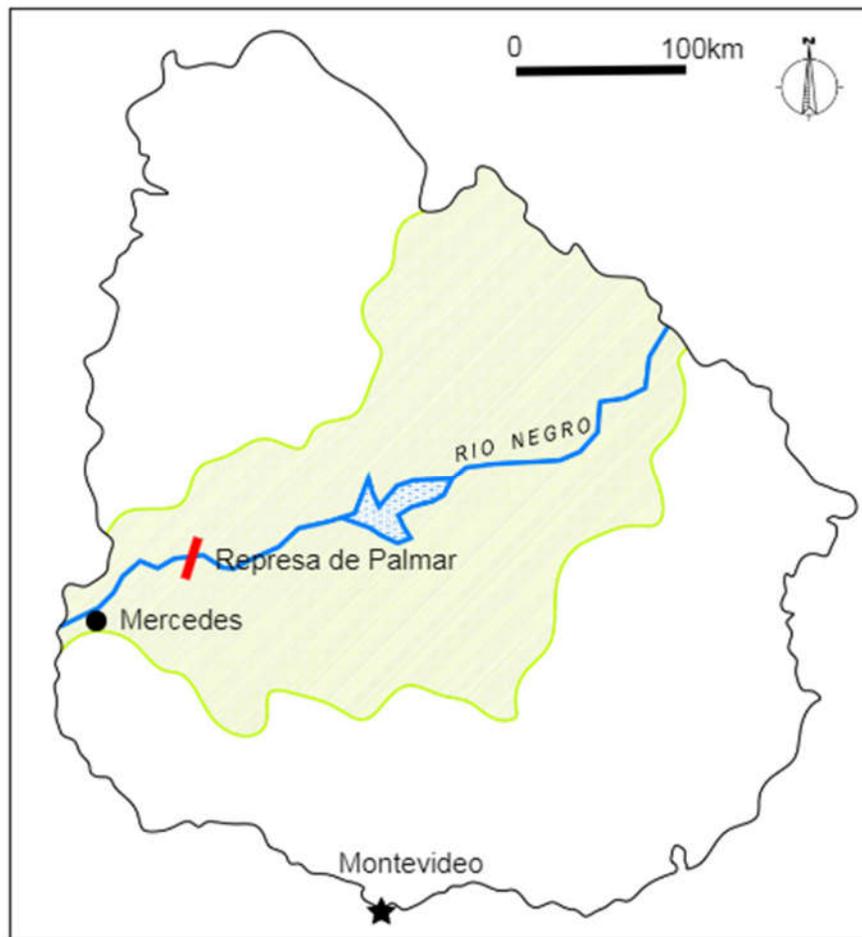


Ilustración 4. Uruguay, el Río Negro y su cuenca.

Desde su nacimiento en el estado de Rio Grande do Sul en Brasil, hasta su desembocadura en el Río Uruguay, tiene tres represas hidroeléctricas. La Represa Hidroeléctrica de Palmar se encuentra a aproximadamente a 150 km de su desembocadura en el Río Uruguay. Fue puesta en servicio en 1982, tiene un salto neto de 27,5 m y la superficie de su embalse es de 320 km². Aguas arriba, aproximadamente a 300 km y a 400 km de la desembocadura, se encuentran las Represas Hidroeléctricas de Baygorria y Rincón del Bonete respectivamente, que se pueden ver en la ilustración 5.



Ilustración 5. Ubicación de represas del Río Negro, el Río Uruguay y el Río Paraná. (Fuente: Google Earth)

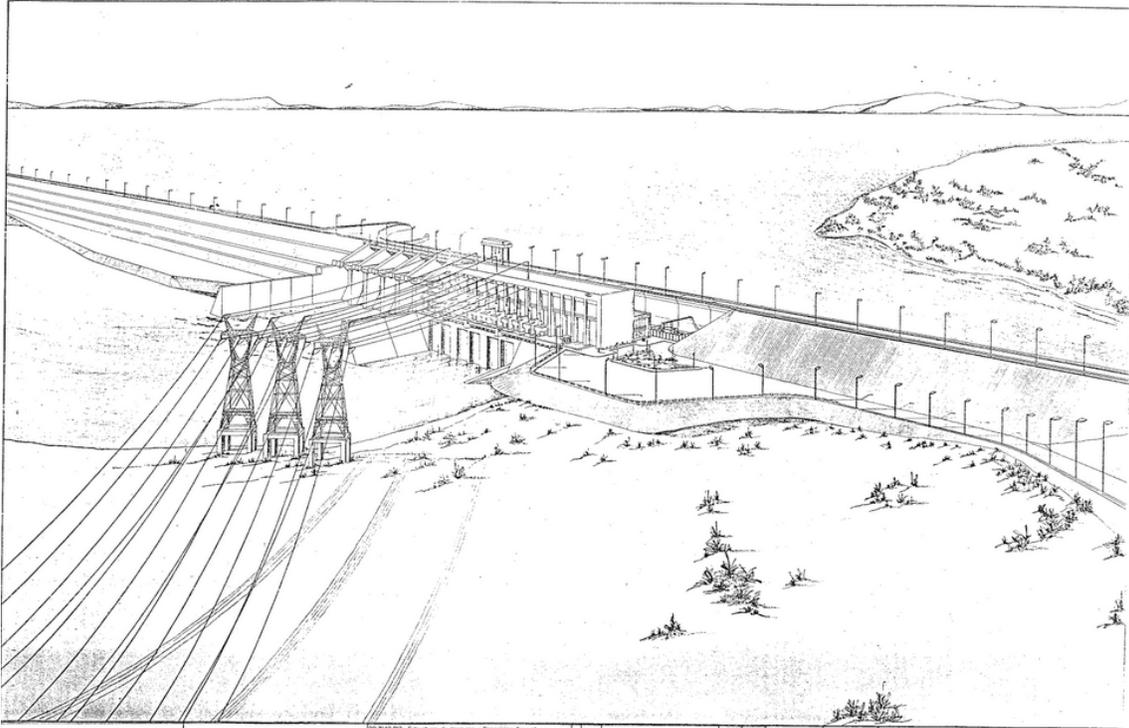


Ilustración 6. Esquema de la Represa de Palmar. (Fuente: U.T.E.)



Ilustración 7. Represa de Palmar vista desde aguas abajo. (Fuente: Google Maps)

2.1 Climatología.

Para la caracterización del clima de Palmar se han tomado los datos de la estación meteorológica más cercana, en la ciudad de Mercedes, aproximadamente a 60 km de la represa.

Se obtienen del Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET) las estadísticas climáticas, tal cual son presentadas, para dos períodos separados. La tabla 1 muestra los promedios mensuales y anuales para el período 1961-1990 y registra las siguientes variables: temperatura media, temperatura máxima absoluta y temperatura mínima absoluta, temperatura máxima media, temperatura mínima media, humedad relativa media, presión atmosférica media, horas de sol o insolación acumulada media, presión de vapor de agua, velocidad media del viento, dirección predominante del viento, acumulados promedios de precipitación y acumulado promedio de días con precipitación mayores o iguales a 1 milímetro. La tabla 2 muestra los promedios mensuales y anuales para el período 1991-2020 y registra las siguientes variables: temperatura media, temperatura máxima absoluta y temperatura mínima absoluta, temperatura máxima media, temperatura mínima media, acumulados promedios de precipitación y acumulado promedio de días con precipitación mayores o iguales a 1 milímetro de precipitación acumulada.

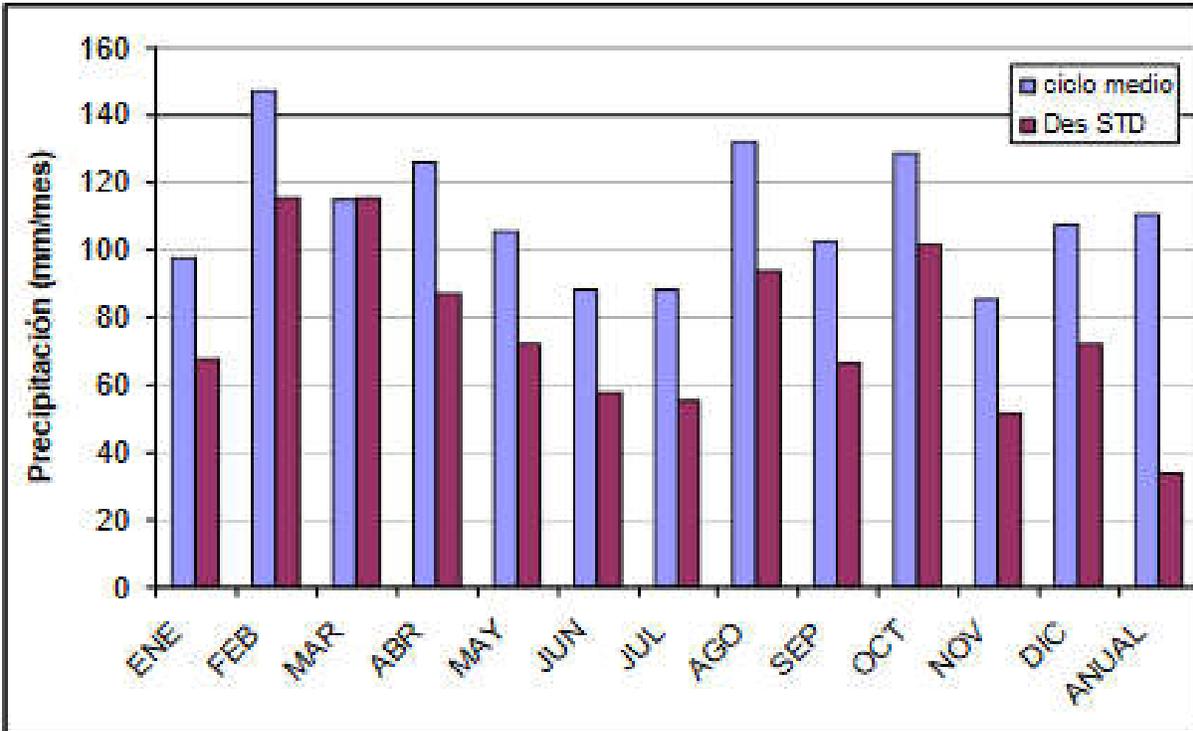
Tomando la hipótesis de que la separación de los registros por parte de INUMET en dos períodos se debe a que se decide dejar de registrar ciertas variables, es que se realiza la tabla 3 obteniendo los promedios mensuales de cada variable para ambos períodos. Se obtiene que la temperatura media anual es de 17,6 °C, una temperatura máxima media de 23,8 °C, una temperatura mínima media de 11,4 °C y una precipitación acumulada anual media de 1172 mm.

Por ende, según la clasificación de Koppen, el área de estudio se encuentra dentro de las siguientes características:

- Templado, moderado, lluvioso; tipo “C”
- Temperie húmeda; tipo “f”
- Temperatura del mes más cálido superior a 22°C; tipo “a”

Entonces, al área de estudio le corresponde la clasificación climática Koppen: “Caf”.

Es importante destacar la variabilidad en la precipitación mensual, que no se aprecia en las tablas anteriores, pero si se puede apreciar en la gráfica 1, la cual es superior a la variabilidad en la precipitación anual.



Gráfica 1. Ciclo medio anual de precipitación y desviación estándar en la cuenca del río Yí para el período 1981-2012.
 (Fuente: IMFIA, 2013)

Tabla 1. Climatología registrada en Mercedes en el Período 1961-1990. (Adaptado de INUMET)

Período 61-90 Ciudad de Mercedes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Temperatura media (°C)	24,3	23,3	20,9	17,2	13,9	10,9	11,1	12,1	13,2	16,8	19,8	22,8	17,3
Temperatura máxima absoluta (°C)	40,4	39,8	37,4	33,8	32,2	28,6	30,5	33,00	31,4	36,4	36,6	39,1	40,4
Temperatura mínima absoluta (°C)	0,00	5,3	2,2	-1,3	-4,2	-7,9	-7,00	-5,00	-5,6	-0,6	2,00	3,00	-7,9
Temperatura máxima media (°C)	31,1	29,8	27,1	23,5	19,8	16,5	16,6	18,2	20,3	23,2	26,2	29,3	23,5
Temperatura mínima media (°C)	17,5	17,2	14,8	11,3	8,00	5,7	6,00	6,2	7,7	10,5	13,1	16,00	11,2
Humedad relativa media (%)	61,00	61,00	72,00	76,00	79,00	87,00	86,00	75,00	74,00	76,00	64,00	60,00	73,00
Presión atmosférica media (hPa)	1010,3	1011,6	1013,7	1015,4	1016,5	1017,5	1018,1	1017,7	1017,6	1015,2	1012,6	1010,8	1014,7
Tiempo de insolación directa acumulada (hrs)	288,5	223,6	234,00	188,00	166,7	138,3	150,2	167,3	194,1	235,4	253,4	279,7	2519,2
Presión del vapor media (hPa)	18,6	17,4	17,8	15,00	12,6	11,3	11,4	10,6	11,8	14,5	14,8	16,6	14,4
Velocidad del viento media (m s ⁻¹)	3,6	3,5	3,2	2,9	3,00	3,2	3,5	3,7	4,1	3,9	3,8	3,6	3,5
Precipitación acumulada (mm)	100,00	153,00	127,00	91,00	85,00	60,00	70,00	65,00	85,00	102,00	91,00	104,00	1130,00
Días con precipitación >=1 mm	5	6	6	5	5	5	5	5	5	6	6	5	64

Tabla 2. Climatología registrada en Mercedes en el período 1991-2020. (Adaptado de INUMET)

Período 91-20 Ciudad de Mercedes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Temperatura media (°C)	24,7	23,5	21,7	18,00	14,5	11,8	10,9	12,8	14,5	17,5	20,6	23,1	17,8
Temperatura máxima absoluta (°C)	41,5	38,1	36,6	37,2	32,1	30,2	29,5	33,3	36,1	36,00	39,7	41,7	41,7
Temperatura mínima absoluta (°C)	6,5	6,00	3,6	-1,2	-4,5	-8,2	-7,6	-4,9	-4,4	-3,5	0,4	4,8	-8,2
Temperatura máxima media (°C)	31,5	29,8	28,00	24,2	20,3	17,3	16,6	19,1	20,8	23,8	27,4	30,00	24,1
Temperatura mínima media (°C)	17,9	17,2	15,3	11,7	8,7	6,1	5,3	6,5	8,2	11,2	13,7	16,2	11,5
Precipitación acumulada (mm)	133,00	124,00	134,00	117,00	79,00	68,00	61,00	71,00	79,00	121,00	97,00	132,00	1214,4
Días con precipitación >=1 mm	6	7	6	7	5	5	5	5	5	8	6	7	72

Tabla 3. Climatología registrada en Mercedes promediando ambos períodos para las variables disponibles. (Adaptado de INUMET)

Período 61-20 Ciudad de Mercedes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Temperatura media (°C)	24,5	23,4	21,3	17,6	14,2	11,4	11,0	12,5	13,9	17,2	20,2	23,0	17,6
Temperatura máxima absoluta (°C)	41,0	39,0	37,0	35,5	32,2	29,4	30,0	33,2	33,8	36,2	38,2	40,4	41,7
Temperatura mínima absoluta (°C)	3,3	5,7	2,9	-1,3	-4,4	-8,1	-7,3	-5,0	-5,0	-2,1	1,2	3,9	-8,2
Temperatura máxima media (°C)	31,3	29,8	27,6	23,9	20,1	16,9	16,6	18,7	20,6	23,5	26,8	29,7	23,8
Temperatura mínima media (°C)	17,7	17,2	15,1	11,5	8,4	5,9	5,7	6,4	8,0	10,9	13,4	16,1	11,4
Precipitación acumulada (mm)	116,50	138,50	130,50	104,00	82,00	64,00	65,50	68,00	82,00	111,50	94,00	118,00	1172,20
Días con precipitación >=1 mm	6	7	6	6	5	5	5	5	5	7	6	6	68

2.2 Geología, geomorfología y edafología.

Uruguay se divide en 10 zonas geomorfológicas, como se puede observar en la ilustración 8, la represa de Palmar se encuentra en la zona geomorfológica denominada Cuenca sedimentaria del Litoral Oeste, y es descrita por Panario (1986) de la siguiente forma:

“La frecuente existencia de capas de distinta dureza en los sedimentos formados por pavimentos de bloques, resultantes de anteriores retrocesos de escarpas de los que quedan muy pocos relictos como el Cerro del Clavel, o pequeñas elevaciones de arenisca de Asencio, o caliches calcáreos horizontales con bordes escarpados, cuando preservan una superficie de extensión suficiente, generan interfluvios de lomadas (camino de la Cuchilla). Cuando esta superficie es menor, colinas tabulares, y cuando el retroceso de las escarpas permitió la generación de un paisaje por debajo de los mismos, formando valles de lomadas, en general sin mucha expresión de superficie, como las existentes en el departamento de Río Negro (Mellizos) Cuencas de Sánchez Grande y Chico, Quebracho, etc.”

En cuanto a la pendiente, la ilustración 9 muestra los 9 distritos en los que se divide el país. El relieve de la zona de estudio varía entre mayoritariamente zonas de plano suave con una pendiente mayor a 2% y menor que 6%, y zonas de plano fuerte con pendientes mayores a 6% y menores a 10% y pequeños sitios ondulado suave, con pendientes mayores a 10% y menores a 16%, que corresponde con la elección del sitio para realizar un embalse (Brazeiro & Universidad de la República, 2015).

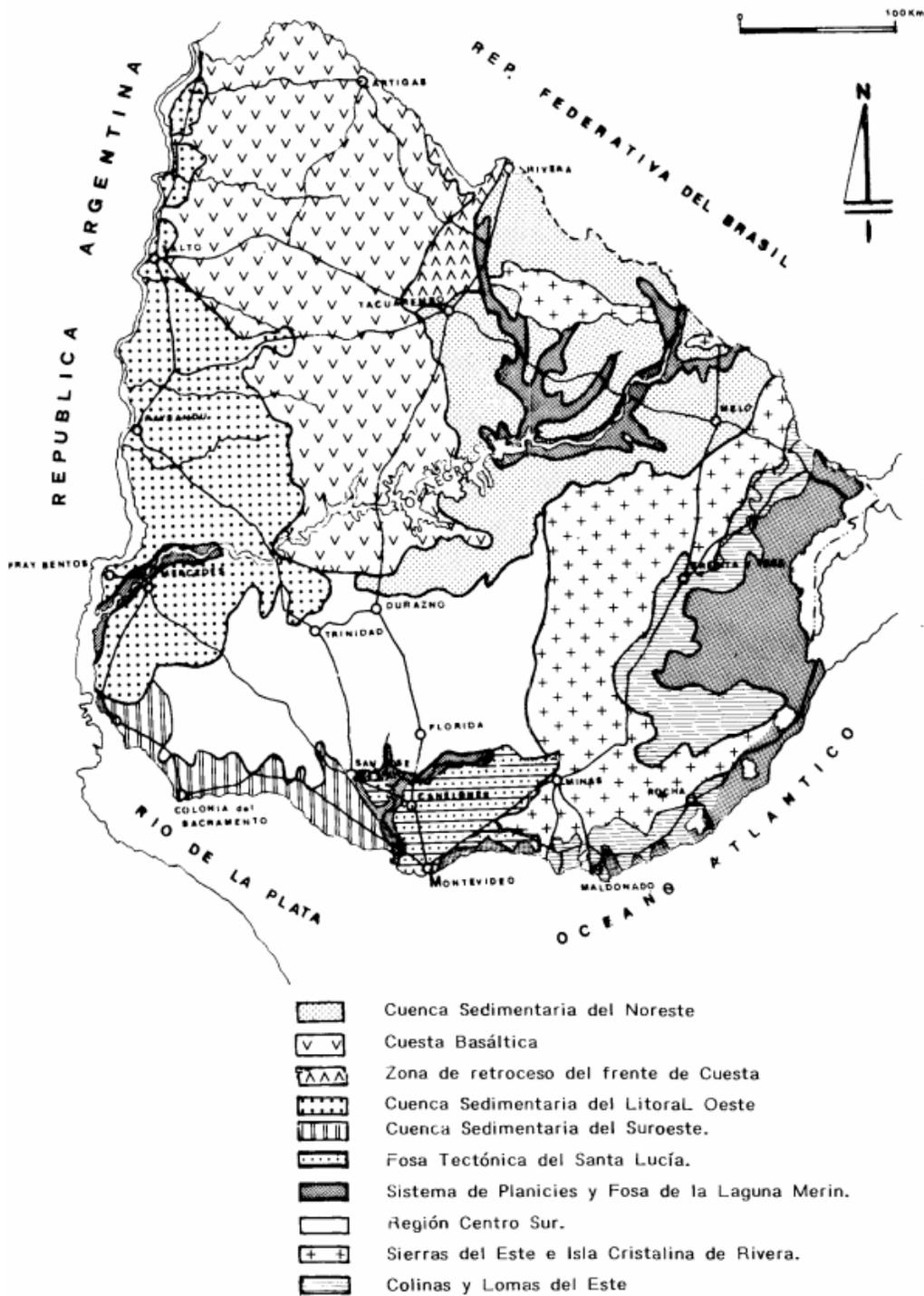


Ilustración 8. Mapa geomorfológico de Uruguay. (Fuente: Panario 1986)

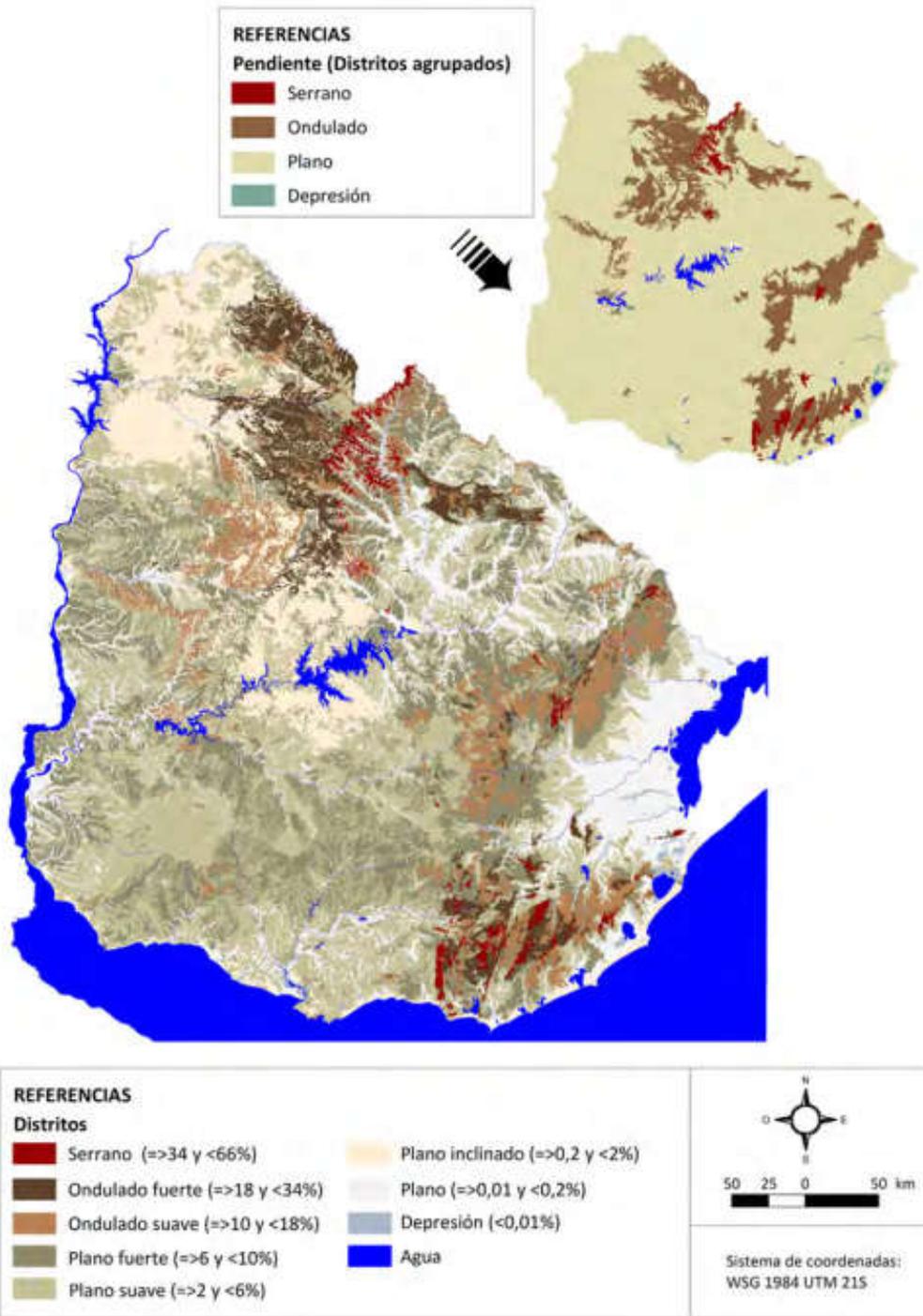


Ilustración 9. Descripción de la pendiente de Uruguay separando en 8 distritos. (Fuente: Brazeiro A (2015))

El sitio de estudio se encuentra en la cuenca geológica del litoral la cual es parte de la cuenca norte, la cual esta compartida entre Uruguay y Argentina. Específicamente en esta área se encuentran los basaltos de la formación Arapey, del Cretácico Inferior, de hace 160 millones de años, de origen ígnea, básicamente rocas volcánicas de composición básica Bossi et al (1975). Por encima de estos basaltos, pero en subsuelo, está la formación Guichón. También del Cretácico Superior, de 110 millones de años, son areniscas que se depositaron en un ambiente semiárido con conos aluviales y ríos efímeros. Son arenas duras ya que entran en una clasificación granulométrica entre 2 mm y 62 micras. Luego viene la formación Mercedes, también del Cretácico Superior, llamada así por la ciudad de Mercedes donde aflora. También son arenas, es muy parecida a la formación Guichón, pero con alguna sutileza que las diferencia. En esta formación se encuentran materiales de alto valor paleontológico, como huevos de dinosaurios, que deben ser conservados y por tanto tenidos en cuenta a la hora de intervenir el terreno. Luego de esta formación hay un hiato sedimentario, donde no hubo depósito de sedimentos o erosión. Luego de este hiato se encuentra la Formación Fray Bentos del Oligoceno, son loes depósitos eólicos finos, tamaño limo o arcillas con bancos de carbonatos asociados a nódulos o concreciones carbonáticas. Por encima, con otro hiato muy importante se encuentra la Formación Libertad del Holoceno. Es la última formación y sobre ella se desarrollan los suelos actuales del Uruguay (Veroslavsky et al., 2003).

2.3 Hidrografía e hidrología.

Se consideran sitios claves al Río Yí y al Arroyo Grande (sur) por ser importantes cursos de agua, sin regulación, conteniendo hábitat para los peces migradores y que desembocan en el embalse de la Represa de Palmar.

2.3.1 Arroyo Grande Sur.

Desemboca en el embalse de Palmar aproximadamente a 35 km de la represa. Tiene un largo aproximado de 135 km y drena una cuenca de 3.120 km². Es un arroyo libre, es decir que no tiene infraestructura que afecte su régimen de caudales.



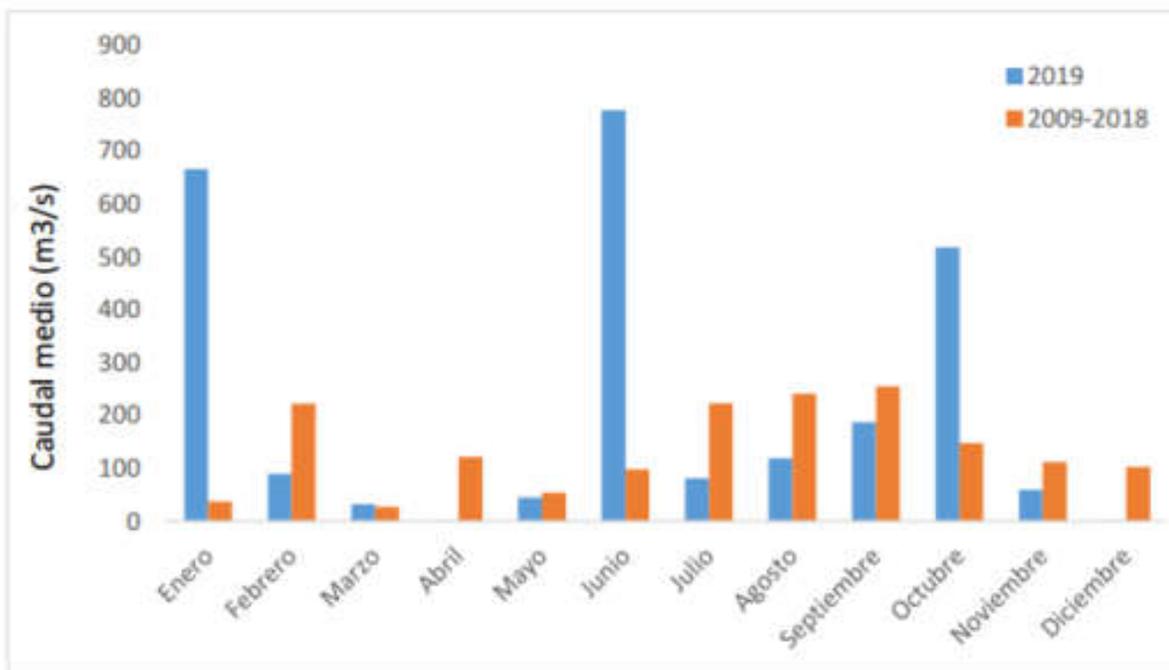
Ilustración 10. Principales afluentes del embalse de Palmar. (Fuente: Google Earth)

2.3.2 Río Yí.

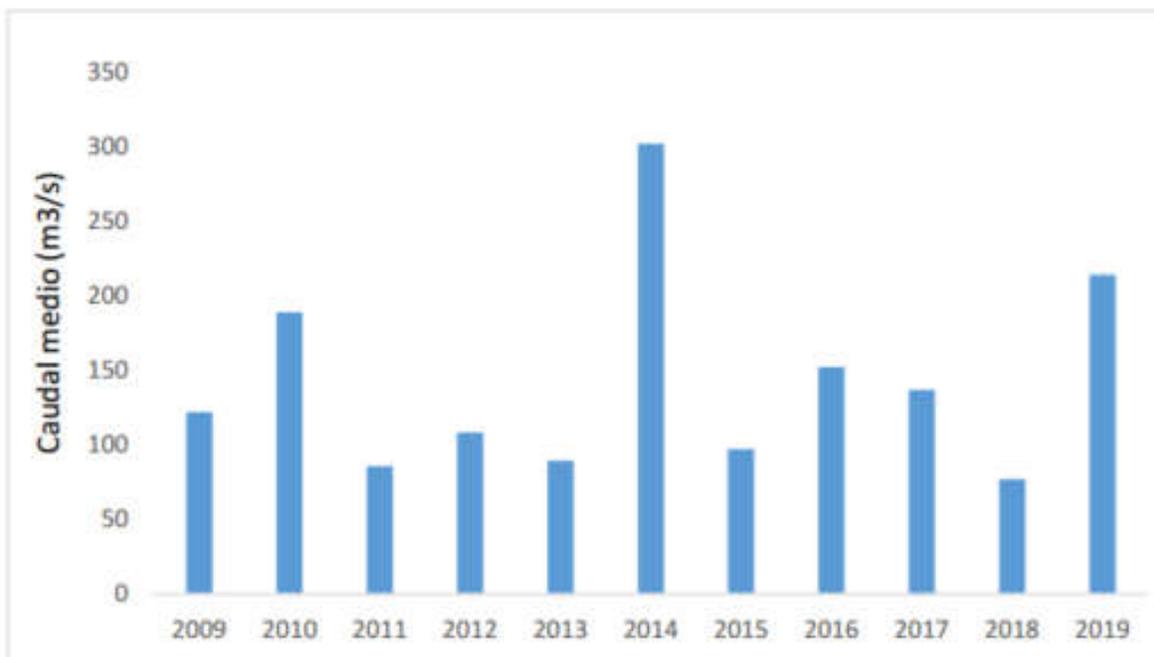
Es el principal afluente del Río Negro en su margen sur. Desemboca en el embalse de Palmar a una distancia aproximada de 40 km de la represa. Tiene un largo de 210 km y drena una cuenca de 12.600 km². En su recorrido cruza tres centros poblados y viven aproximadamente 78.000 habitantes en su cuenca. Se caracteriza por tener frecuentes crecidas y escurrimiento rápido.

La gráfica 2 muestra que los meses de invierno y primavera son los más caudalosos, duplicando el caudal medio anual. La grafica 3 muestra el caudal promedio anual, donde se observa una variabilidad importante del caudal correspondiente con la variabilidad en las precipitaciones en distintos años y de donde se infiere un caudal promedio de aproximadamente 100 m³ s⁻¹ cercano al 10% del caudal del Río Negro. (*Monitoreo de Calidad de Agua de La Cuenca Del Río Yí- Informe de Datos de Calidad de Agua Superficial-2019, 2020*).

En la ciudad de Durazno, presenta una barrera transversal que se puede ver en las ilustraciones 10 y 11. Aparentemente es un dique para generar aguas profundas para baños y no tiene ningún otro uso. Su permeabilidad depende de los caudales que estén circulando, quedando impermeable en épocas de bajo caudal como se observa en la figura 11.



Gráfica 2. Caudales promedios mensuales del período 2009-2018 y del 2019 aforado en la ciudad de Durazno. (Fuente: MVOTMA, 2020)



Gráfica 3. Caudal promedio anual para los años del período 2009-2019, aforado en la ciudad de Durazno. (Fuente: MVOTMA, 2020)

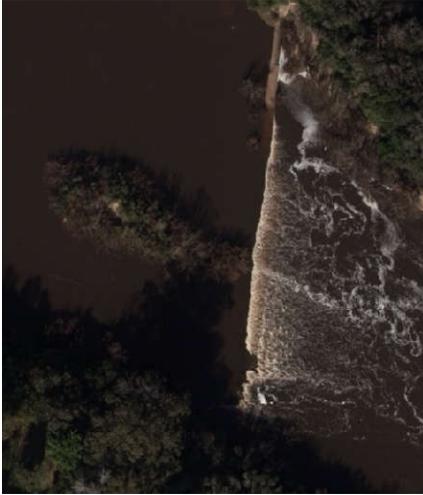


Ilustración 10 y 11. Barrera transversal en el Río Yí en la ciudad de Durazno. (Fuentes: Visualizador IGM y Google Earth)

2.4 Especies migradoras.

A continuación, se presentan las principales especies migradoras del Río Negro. Coincidiendo con toda la región Neotropical, los peces más diversificados y con mayor biomasa son los Characiformes y los Siluriformes, los órdenes con más peces en esta lista de migradores. Las longitudes máximas presentadas a continuación corresponden a la Longitud Estándar, que se mide desde el extremo anterior de la mandíbula superior hasta el fin del pedúnculo caudal (excluyendo la aleta caudal) (Serra et al., 2014). Las especies migradoras presentes en el Río Negro, son potádromas y se reproducen en primavera y verano, entre los meses de octubre a marzo, respondiendo al aumento de precipitaciones y de temperatura del agua. En estos meses inician migraciones aguas arriba y es cuando salen de los Ríos Principales como el Paraná y Uruguay adentrándose en afluentes como el Río Negro. (Carolsfeld et al., 2003)

***Prochilodus lineatus* (Valenciennes, 1837)**



Ilustración 11. Prochilodus lineatus, Sábalo

Pertenece al orden Characiforme. Su nombre común es Sábalo, tiene una longitud máxima de 80 cm y peso máximo publicado 7,2 kg. Se alimenta de detritos y perifiton.

El Sábalo es de gran importancia para el funcionamiento de los sistemas acuáticos, ya que es la especie migradora con mayor biomasa y que por sus hábitos alimenticios influye en la transparencia del agua (Mormul et al., 2012). Es el principal recurso pesquero de agua dulce de Uruguay.

Realiza largas migraciones reproductivas y alimenticias, relacionadas a los pulsos de inundaciones y crecientes. Pueden trasladarse hasta 43 km por día y 620 km en total. (Delfino & Baigún, 1985)

Se considera extinto en la cuenca del Río Negro aguas arriba de la represa de Palmar. Tanto la publicación de peces del Río Negro de Serra et al. (2014) como el Diagnóstico del Estado de los Recursos Pesqueros del Lago Artificial de Palmar respaldan esta afirmación (Ares, 2008).

En cuanto a sus necesidades para el pasaje por paso de peces, no serán definitorias ya que varios estudios de eficiencia de paso de peces realizados en Sudamérica (Lira et al., 2017; Oldani et al., 2007) muestran que el Sábalo tiene un alto porcentaje de paso. Si bien es importante su paso, para el diseño del paso de peces se tendrán en cuenta los requisitos de otras especies más exigentes.

***Leporinus obtusidens* (Valenciennes, 1837)**



Ilustración 12. Leporinus obtusidens, Boga

Pertenece al orden Characiforme. Su nombre común es Boga, alcanza una longitud máxima de 70 cm y peso máximo publicado 5,8 kg. Es una especie omnívora, se alimenta principalmente de semillas, insectos acuáticos y moluscos. Al igual que el Sábalo tiene una gran abundancia, biomasa y realiza grandes migraciones, llegándose a registrar hasta 540 km. Es importante para la pesca comercial, artesanal y deportiva.

Al igual que el Sábalo, se la considera extinta en la cuenca del Río Negro aguas arriba de la represa de Palmar. Tanto la publicación de Peces del Río Negro de Serra et al. (2014) como el Diagnóstico del Estado de los Recursos Pesqueros del Lago Artificial de Palmar respaldan esta afirmación (Ares, 2008).

De la misma manera que el Sábalo no será definitoria para el diseño del paso de peces por tener requisitos más laxos que otras especies.

***Salminus brasiliensis* (Cuvier, 1816)**



Ilustración 13. Salminus brasiliensis, Dorado

Al igual que las especies anteriores pertenece al orden Characiforme. Su nombre común es Dorado, alcanza una longitud máxima 100 cm y un peso máximo publicado 31,4 kg. Se alimenta principalmente de peces. En la época de migración se acumulan en los rápidos, donde emboscan peces de nado más lento.

Se registraron migraciones de hasta 850 km en tan solo 41 días, velocidad promedio de 21 km por día (Delfino & Baigún, 1985). Es muy importante para la pesca deportiva y artesanal por la gran calidad de su carne y su capacidad de salto que lo hace muy atractivo para este deporte.

Esta especie definirá variables de diseño del paso de peces por su acumulación aguas abajo de la represa en zonas de flujo de alta velocidad y por ser de las especies migradoras con menor paso en los dispositivos de paso de peces (Agostinho et al., 2002; Oldani et al., 2007; Oldani & Baigún, 2002).

Se considera extinta en la cuenca del Río Negro aguas arriba de la represa de Palmar. Tanto la publicación de Peces del Río Negro de Serra et al. (2014) como el Diagnóstico del Estado de los Recursos Pesqueros del Lago Artificial de Palmar respaldan esta afirmación (Ares, 2008). Esporádicamente surgen registros de capturas aguas arriba de la represa de Palmar, pero son asociadas a sueltas incidentales de capturas realizadas por pescadores aguas abajo de la Represa.

***Pseudoplatystoma corruscans* (Spix & Agassiz, 1829)**



Ilustración 14. Pseudoplatystoma corruscans, Surubí

Pertenece al orden de los Siluriformes, conocidos en España como peces gato por su traducción de su nombre en inglés *catfish*. Su nombre común es Surubí. Alcanza una longitud máxima de 150 cm y un peso máximo publicado de 100 kg. Se alimenta principalmente de peces, siendo más activos durante la noche. Muy importante para la pesca artesanal y deportiva.

A diferencia de los Characiformes, los siluriformes son nadadores de fondo y prefieren habitar pozas profundas de aguas quietas.

Esta especie también definirá variables de diseño del paso de peces por su importancia para la pesca deportiva, por ser de las especies con poco paso por dispositivos de paso de peces y por sus hábitos de nado (Agostinho et al., 2002; Oldani et al., 2007; Oldani & Baigún, 2002).

Se considera extinta en la cuenca del Río Negro aguas arriba de la represa de Palmar. Tanto la publicación de Peces del Río Negro de Serra et al. (2014) como el Diagnóstico del Estado de los Recursos Pesqueros del Lago Artificial de Palmar respaldan esta afirmación (Ares, 2008).

***Luciopimelodus pati* (Velenciennes, 1835)**



Ilustración 15. Luciopimelodus pati, Patí

Pertenece al orden Siluriformes. Su nombre común es Patí, alcanza un máximo 100 cm. Se alimenta principalmente de peces, crustáceos y moluscos. Muy importante para la pesca artesanal y deportiva. Similar al Surubí.

Se considera extinta en la cuenca del Río Negro aguas arriba de la represa de Palmar. Tanto la publicación de Peces del Río Negro de Serra et al. (2014) como el Diagnóstico del Estado de los Recursos Pesqueros del Lago Artificial de Palmar respaldan esta afirmación (Ares, 2008).

***Pimelodus maculatus* (Lacépède, 1803)**



Ilustración 16. Pimelodus maculatus, Bagre amarillo

Pertenece al orden Siluriforme. Su nombre común es Bagre amarillo. Alcanza una longitud máxima de 50 cm y un peso máximo publicado de 2,4 kg. Se alimenta de larvas de insectos, bivalvos, cangrejos, peces y semillas. Tiene una amplia distribución en toda la cuenca del Río Negro, es común en los embalses por lo que no será definitorio para el diseño del paso de peces.

Se descarta como especie objetivo ya que está presente en toda la cuenca del Río Negro.

***Potamotrygon brachyura* (Günther, 1880)**



Ilustración 17. Potamotrygon brachyura, Raya

Pertenece al orden myliobatiformes. Nombre común Raya o Chucho. Alcanza un diámetro máximo de 110 cm de diámetro y un peso máximo publicado de 208 kg.

Se alimenta de moluscos e insectos acuáticos. Se desconoce el comportamiento migratorio de la Raya, sin embargo, es considerada en este estudio como especie migradora con necesidades de paso, ya que antes de la construcción de las represas del Río Negro habitaba los grandes afluentes de toda la cuenca. Actualmente se considera extinta en la cuenca del Río Negro aguas arriba de la represa de Palmar. Tanto la publicación de Peces del Río Negro de Serra et al. (2014) como el Diagnóstico del Estado de los Recursos Pesqueros del Lago Artificial de Palmar respaldan esta afirmación (Ares, 2008).

3. Análisis de soluciones para el paso de peces migradores.

No hay una única solución de paso de peces que acomode la totalidad de las necesidades de los individuos de cada especie. Por eso se plantean tres soluciones posibles para el problema. Además de las soluciones de paso de peces en la represa se deberá contemplar la demolición de la barrera transversal del Río Yí en Durazno, ya que el Río Yí es de las zonas más relevantes para ser repoblada por los peces migradores.

3.1 Solución 0. Retiro de la represa.

Solución definitiva. Esta solución irá cobrando relevancia a medida que se va alcanzando la vida útil de la represa hidroeléctrica, que los argumentos y conocimientos ambientales se profundicen y que se afiancen nuevas tecnologías de generación de energía. Además de la recuperación de la conectividad fluvial, con la mejora de todos los servicios ecosistémicos asociados. Dada la particularidad de la cuenca del Río Negro, el embalse generado por la represa es de grandes dimensiones inundando un área de 320 km². Junto al retiro de la represa, se vaciaría el embalse y se recuperarían ese terreno. De la tabla 4 se obtienen los costos promedio de ventas de campo para los departamentos de Río Negro, Soriano, Flores y Durazno. Se calcula un promedio de 4.531 EUR/ha (1 USD = 1EUR), por lo que la estimación del valor de los terrenos inundados asciende a EUR 144.992.000. Además, en la tabla 5 se obtienen los valores promedio de arrendamiento para los cuatro departamentos de 191,5 EUR/ha/año, se estima una renta anual de EUR 6.128.000.

Según la *United States Environmental Protection Agency* (EPA), las razones principales por las cuales se llevan varias décadas derribando presas obsoletas en Estados Unidos y más recientemente en Europa son las siguientes:

- Restauración ecológica
- Desarrollo económico de comunidades
- Restauración de migración de peces
- Mejoras en oportunidades recreativas
- Preocupaciones con inundaciones localizadas

Sin embargo, teniendo en cuenta que según el *U.S. Department of Energy* la vida útil promedio de las represas hidroeléctricas es de 100 años, se plantean dos soluciones adicionales para mejorar la conectividad del Río, antes de alcanzado este plazo que se estaría dando en el año 2081.

Tabla 4 y 5. Ventas de campo y arrendamientos para cada departamento en 2021. (Fuente: Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca)

Departamento	Número de operaciones	Superficie vendida		Valor	
		Total (ha)	Promedio (ha)	Total (miles de USD)	Promedio (USD/ha)
Total	536	114.385	213	378.042	3.305
Artigas	9	843	94	1.664	1.975
Canelones	59	1.669	28	7.914	4.742
Cerro Largo	22	2.108	96	4.631	2.197
Colonia	48	3.098	65	17.882	5.773
Durazno	24	5.196	217	14.691	2.827
Flores	16	5.488	343	20.331	3.705
Florida	36	4.145	115	12.517	3.020
Lavalleja	67	26.953	402	71.203	2.642
Maldonado	57	7.232	127	25.263	3.493
Paysandú	17	7.431	437	22.183	2.985
Río Negro	9	2.450	272	9.708	3.963
Rivera	28	6.680	239	18.125	2.713
Rocha	34	12.672	373	29.039	2.292
Salto	17	1.769	104	3.571	2.019
San José	20	2.516	126	9.097	3.616
Soriano	30	9.616	321	73.386	7.631
Tacuarembó	20	6.808	340	18.439	2.708
Treinta y Tres	23	7.712	335	18.399	2.386

Departamento	Número de contratos	Superficie arrendada		Valor anual	
		Total (ha)	Promedio (ha)	Total (miles USD)	Promedio (USD/ha/año)
Total	2.543	909.233	358	122.050	134
Artigas	152	83.045	546	6.020	72
Canelones	96	8.256	86	1.552	188
Cerro Largo	138	56.229	407	4.660	83
Colonia	273	31.239	114	6.958	223
Durazno	165	54.727	332	6.413	117
Flores	79	30.528	386	5.093	167
Florida	169	34.675	205	4.649	134
Lavalleja	98	23.466	239	2.007	86
Maldonado	23	4.535	197	392	86
Paysandú	163	97.261	597	12.102	124
Río Negro	124	89.785	724	19.224	214
Rivera	90	44.828	498	2.543	57
Rocha	137	39.231	286	4.602	117
Salto	117	75.711	647	5.829	77
San José	177	28.684	162	4.785	167
Soriano	292	92.125	315	24.707	268
Tacuarembó	157	53.642	342	4.609	86
Treinta y Tres	93	61.266	659	5.905	96

3.2 Solución 1: Paso de peces del tipo *by-pass* o canal naturalizado

Dada la baja pendiente del terreno, la ubicación de la represa en un ambiente rural con baja densidad de población y el tipo de uso de suelo, la disponibilidad del “*know how*” y de la maquinaria necesaria para movimientos de tierra, una solución interesante es el paso de peces naturalizado. La ilustración 19 muestra un posible recorrido, utilizando en gran parte cursos de agua existentes y pendientes naturales del terreno.

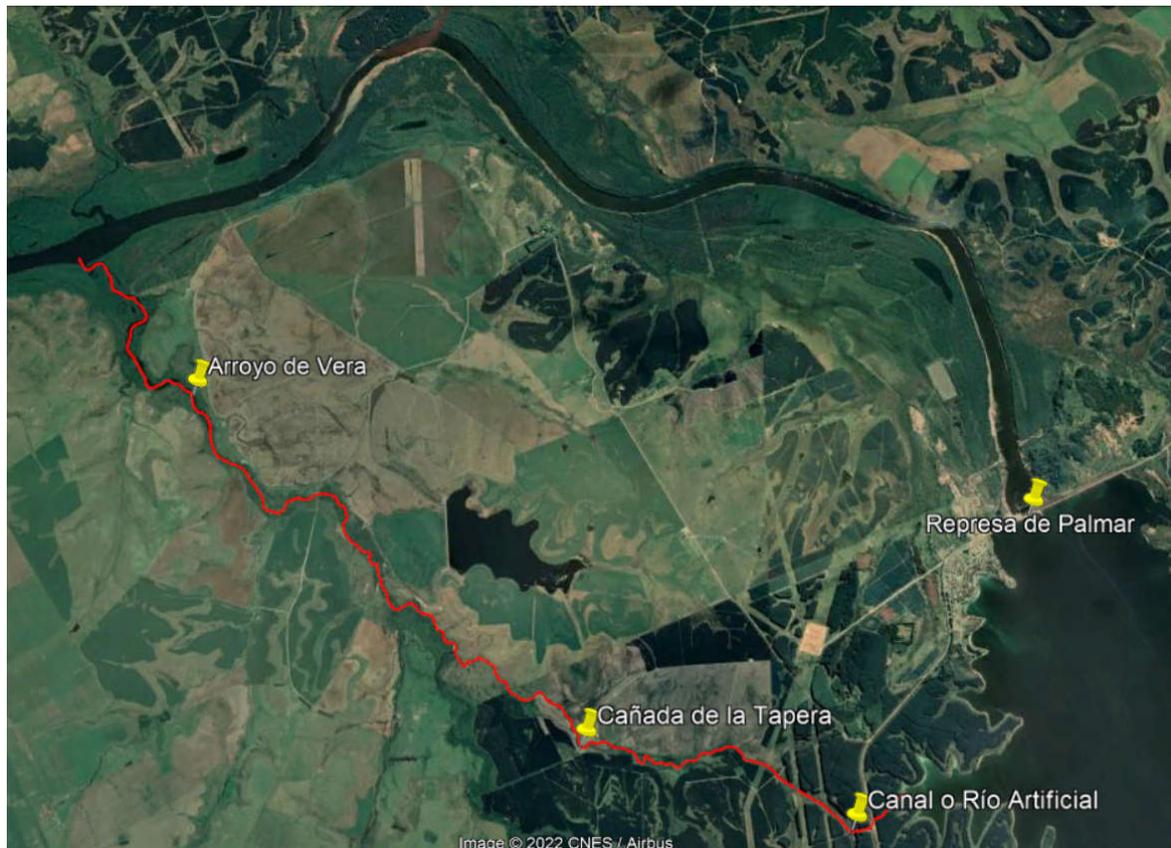


Ilustración 18. Recorrido paso de peces del tipo bypass. (Fuente: Google Earth)

Revisando cartas topográficas se preselecciona el Arroyo de Vera (ilustración 20) como un primer tramo posible del recorrido del canal de paso de peces. Para esto es necesario evaluar la posibilidad que desde su desembocadura en el Río Negro hasta la confluencia con la Cañada de la Tapera, aproximadamente 9,1 km aguas arriba, aumente su caudal en el entorno de $0,50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y las adecuaciones necesarias que habría que realizar para conducirlo. El tramo del paso de peces naturalizado recorrería el Arroyo de Vera desde la desembocadura en el Río Negro, aproximadamente en la cota 9 m.s.n.m. hasta la cota 20 m.s.n.m. donde desemboca la Cañada de la Tapera.

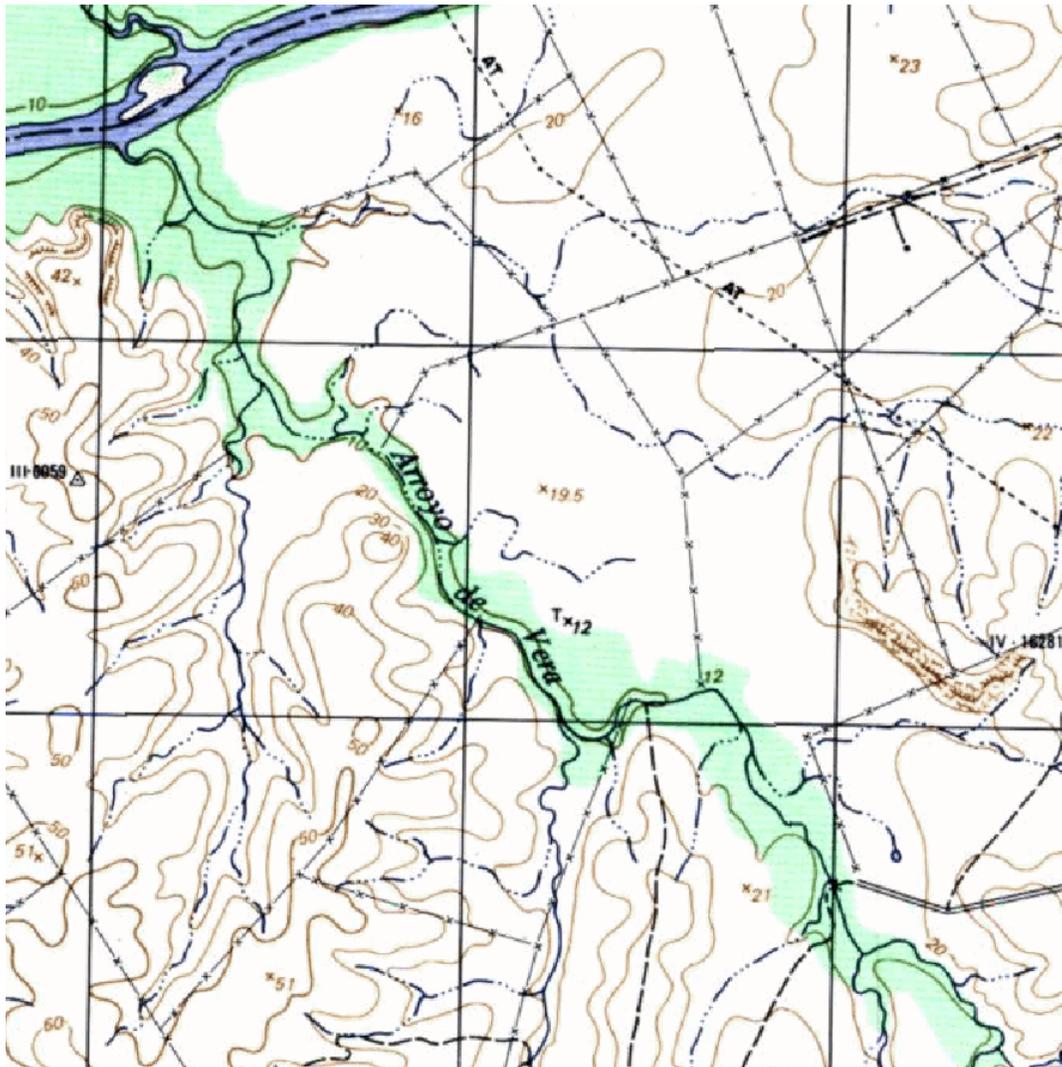


Ilustración 19. Arroyo de Vera. (Fuente: Servicio Geográfico Militar)

El segundo tramo, con 5,95 km sería la cañada de la Tapera. Este tramo deberá ser adecuado para transformarse de un caudal temporal, dependiente de las lluvias, a un caudal practicamente permanente de mínimo $0,50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Recorrería desde su desembocadura en el Arroyo de Vera en la cota 20 m.s.n.m. hasta la cota 35 m.s.n.m (ilustración 21).

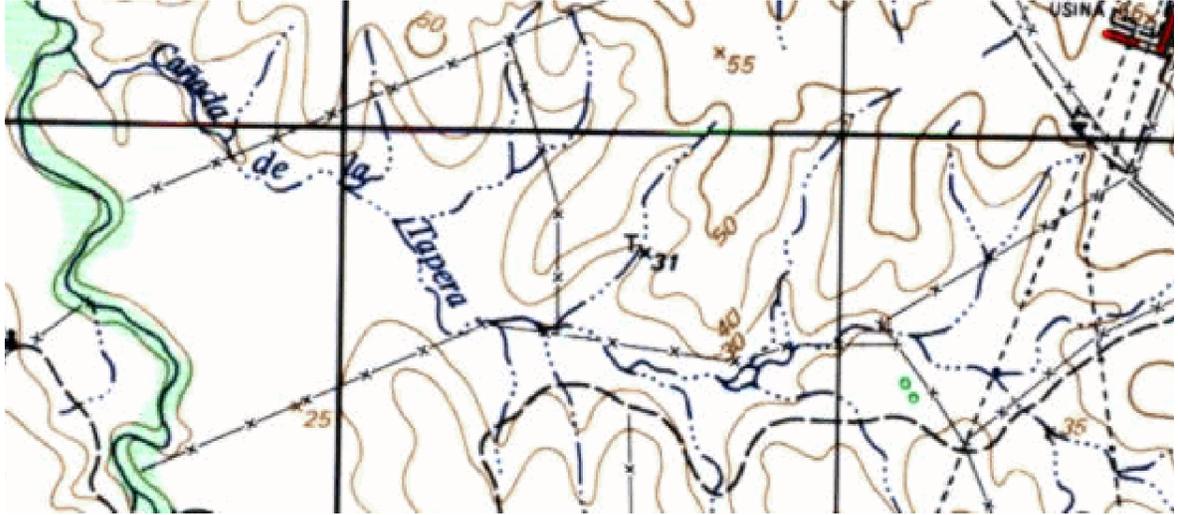


Ilustración 20. Cañada de la Tapera. (Fuente: Servicio Geográfico Militar)

El tercer tramo sería un canal artificial (ilustración 22) de aproximadamente 850 m superando un desnivel desde la cota 35 m.s.n.m., atravesando una divisoria de aguas con una cota aproximada de 55 m.s.n.m. y alcanzando el embalse en la cota 37 m.s.n.m. Para afrontar los cambios de nivel en el embalse se deberá diseñar un canal de toma.



Ilustración 21. Canal artificial. (Modificado del Servicio Geográfico Militar)

Si bien esta solución tiene como ventaja una menor selectividad, es decir que pasarían todas las especies de peces incluida la raya y todos los individuos de peces independiente de su tamaño, tiene la gran desventaja de necesitar gran cantidad de terreno, siendo la mayoría de estos privados. Por esta razón esta solución queda como alternativa y nos concentramos en el diseño de un paso de peces del tipo técnico: escala de escotaduras verticales.

3.3 Solución 2. Paso de peces del tipo escala de escotaduras verticales.

Se selecciona el tipo de paso de escala de escotaduras verticales por las siguientes razones. Son actualmente los mejores pasos de peces del tipo técnico; pueden acomodar una variedad grande de especies y tamaños de peces, incluidas aquellas especies con hábitos de nado por el fondo como la familia de los bagres (peces gato), en particular el Surubí y el Patí que no podrían pasar por otros tipos de pasos técnicos, como en pasos de tabiques vertientes o de tabiques con escotaduras y orificios sumergidos.

Además, pueden dar paso a invertebrados; afrontar variaciones en la cota de aguas arriba; conducir caudales relativamente altos logrando una buena corriente de atracción y son más fiables ante atascamientos de las ranuras que los pasos de estanques tradicionales (Marmulla

et al., 2002). Son el paso técnico más actualizado y con mayor investigación e innovación, recientemente se han construido paso de peces de escotaduras verticales de gran altura con buenos resultados de efectividad como el de *Schwabeck Hydropower Plant*, en Austria (Mader et al., 2020).

Aunque soluciones como ascensores o esclusas son independientes de la altura a franquear, se eligen las escotaduras verticales ya que hay experiencias de estos pasos de peces en Sudamérica, como los ascensores de la Represa de Yacyretá, o las Esclusas de la Represa de Salto Grande, tienen una efectividad muy baja por la alta necesidad de mantenimiento y el poco tiempo real que están en operación sumado a que no tienen una corriente de atracción constante (Oldani et al., 2007).

4. Diseño de paso de peces del tipo escala de escotaduras verticales.

Para el diseño de la escala se utilizará la aplicación *Fish Path* desarrollada por el CEDEX y la Universidad de A Coruña. Para diseñar la escala hay que ingresar el ancho de ranura (b_0), la altura del obstáculo, la pendiente (S_0) y el caudal (Q).

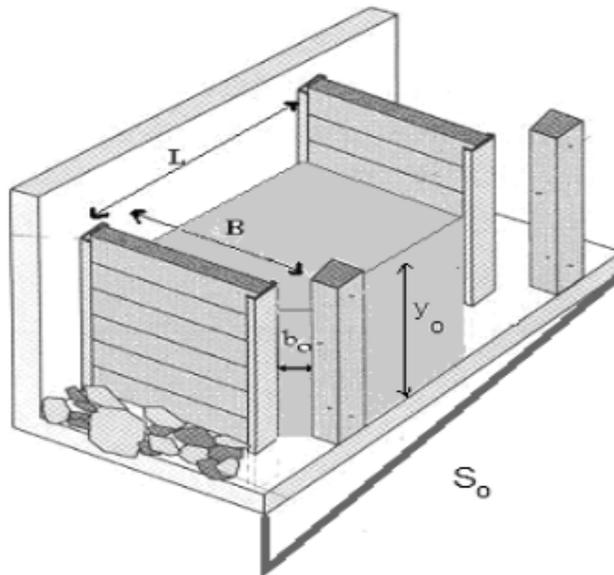


Ilustración 22. Nombre de las variables de diseño. Fuente Martínez et al. 2009

Puertas y sus colaboradores (2012) calcularon los campos de flujos para cuatro diseños genéricos de escotaduras verticales presentados en la ilustración 24, utilizando un modelo numérico. De aquí obtuvieron el coeficiente de descarga C_q para distintas geometrías de piscina. En la ecuación 1 se obtiene el caudal Q , siendo g la aceleración de la gravedad, S la pendiente, L la longitud de la piscina, b el ancho de ranura y h_c el calado. Además, el software también realiza un análisis de aspectos biológicos para distintas especies pero no es de interés para el presente estudio por lo que se obviara esa sección de los resultados.

$$Q = C_q \cdot \sqrt{g \cdot S \cdot L \cdot b \cdot h_c}$$

Ecuación 1

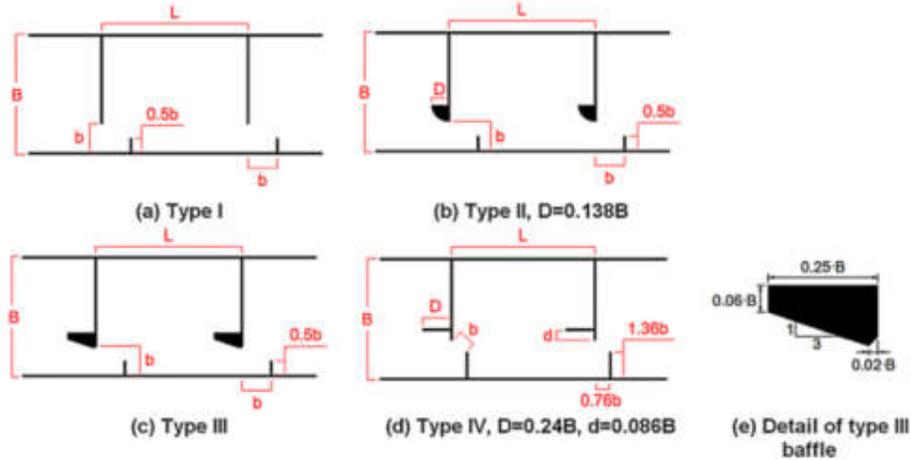


Ilustración 23. Características geométricas de los diferentes diseños de artesas. (Fuente: Puertas et al., 2012)

4.1 Elección del ancho de ranura.

El ancho de ranura es la característica más importante del paso de escotaduras verticales. Este valor se debe seleccionar considerando las especies de peces objetivo, su largo y la amplitud del batido de su cola y la descarga disponible. Ya que como se vio en la ecuación 1, junto con la pendiente y el calado determina el caudal circulante por el paso.

En la tabla 6 se presentan anchos de ranura para distintas especies del hemisferio norte (Gebler, 1991 y Larinier, 1992^a) donde para los Salmones y la trucha atlántica se recomienda un ancho de ranura entre 0,30 y 0,60 m. Revisando en la tabla 7, las longitudes de estas especies vemos que son similares a las especies objetivos de este estudio, por lo que consideramos este rango como una primera aproximación al ancho de ranura.

Tabla 5. Características de diseño de las escotaduras verticales según distintas especies de peces. (Fuente Marmulla et al. 2002)

Fish fauna to be considered		Grayling, bream, chub, others		Sturgeon
		Brown trout	Salmon, sea trout, huchen	
Slot width	s	0.15 – 0.17	0.30	0.60
Pool width	b	1.20	1.80	3.00
Pool length	l_b	1.90	2.75 – 3.00	5.00
Length of projection	c	0.16	0.18	0.40
Stagger distance	a	0.06 – 0.10	0.14	0.30
Width of deflecting block	f	0.16	0.40	0.84
Water level difference	h	0.20	0.20	0.20
Min. depth of water	h_{min}	0.50	0.75	1.30
Required discharge ¹	Q in m ³ /s	0.14 – 0.16	0.41	1.40

¹ calculated for $\Delta h = 0.20$ m and h_{min}

Acercándonos más a las especies objetivo, se toman los b_0 para las especies de la misma familia que son *Prochilodus costatus*, Bagre amarillo y *Leporinus reinhrdti*, con un b_0 de 0,15, 0,15 y 0,10 m respectivamente (Martinez et al., 2009); el Sábalo es aproximadamente dos veces más largo que el *Prochilodus costatus* y la Boga es aproximadamente cuatro veces más largo que el *Leporinus reinhrdti*, realizando un aumento proporcional del b_0 con respecto a la relación de las longitudes de las dos especies de cada familia, se obtienen los anchos de ranura de 0,41 m y 0,28 m respectivamente.

Por último, el mismo autor, en la discusión de su estudio, sugiere utilizar un ancho de ranura menor que el 0,40 m utilizado en Igarapava, ya que parecería que este ancho disminuye la efectividad y aumenta la selectividad en el paso de peces.

Tomando en cuenta esta sugerencia y los rangos anteriores, se selección un valor de 0,30 m.

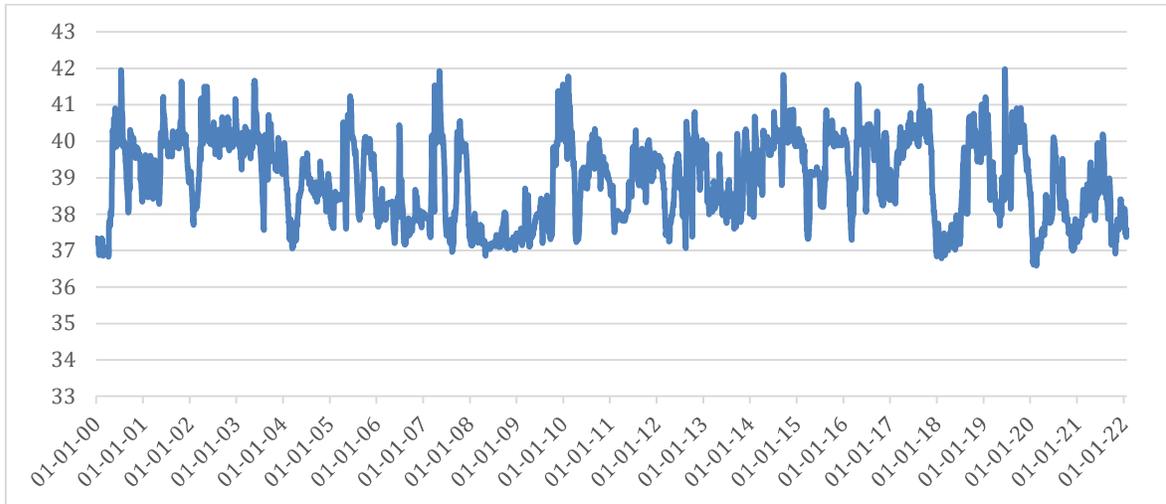
Tabla 6. Largos promedios para distintas especies de peces. (Fuente: Marmulla et al. 2002)

	Fish species	Body length [m]
Sturgeon	<i>Acipenser sturio</i>	3.0
European catfish	<i>Silurus glanis</i>	2.0
Pike	<i>Esox lucius</i>	1.2
Salmon	<i>Salmo salar</i>	1.2
Huchen	<i>Hucho hucho</i>	1.2
Sea lamprey	<i>Petromyzon marinus</i>	0.8
Sea trout	<i>Salmo trutta f. trutta</i>	0.8
Allis shad	<i>Alosa alosa</i>	0.8
Barbel	<i>Barbus barbus</i>	0.8
Lake trout	<i>Salmo trutta f. lacustris</i>	0.8
Bream	<i>Abramis brama</i>	0.7
Orfe	<i>Leuciscus idus</i>	0.7
Carp	<i>Cyprinus carpio</i>	0.7
Chub	<i>Leuciscus cephalus</i>	0.6
Grayling	<i>Thymallus thymallus</i>	0.5
Twaite shad	<i>Alosa fallax</i>	0.4
River lamprey	<i>Lampetra fluviatilis</i>	0.4
Brown trout	<i>Salmo trutta fario</i>	0.4

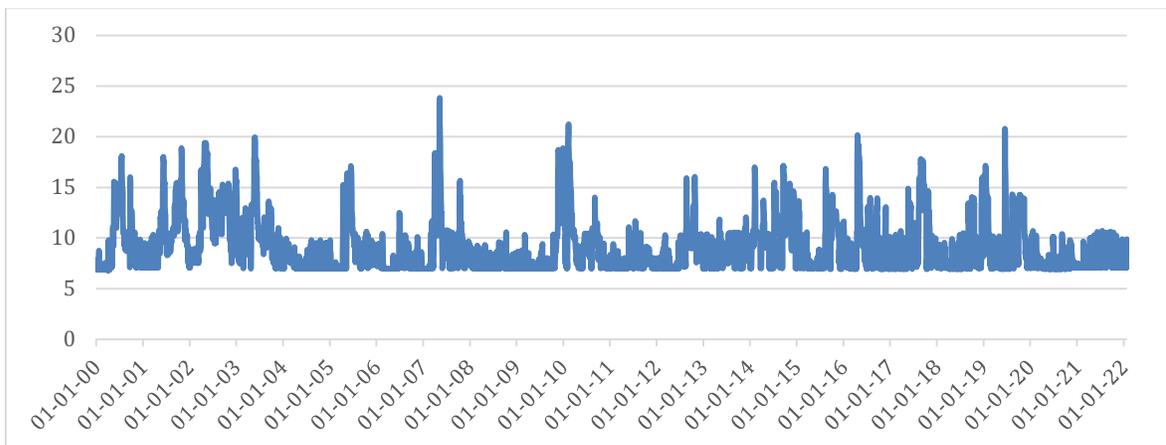
4.2 Altura del obstáculo.

Se analiza una serie de datos diarios para el periodo 2000-2022 con los datos de caudales, cotas del embalse y cotas del Río Negro aguas debajo de la represa. La gráfica 4 muestra como varía la cota del embalse entre un máximo de 41,98 m.s.n.m. y un mínimo de 36,58 m.s.n.m. La gráfica 5 muestra como varía la cota del Río Negro aguas abajo de la represa entre un mínimo de 6,82 m.s.n.m y un máximo de 23,83 m.s.n.m. Esta variación está directamente ligada a los regímenes de descarga a través de la represa.

Para definir la altura del obstáculo, se calcula la diferencia entre la cota del embalse y la cota del Río Negro aguas debajo de la represa. Como las cotas varían, se realiza un análisis más profundo, considerando el percentil 80 de la cota del embalse para los meses de migración (septiembre a marzo) obteniendo una cota de 40,02 m.s.n.m., y como la escala debe estar conectada al fondo del río, se considera la cota mínima de este de 6,82 m.s.n.m., obteniendo una altura de 33,20 m.



Gráfica 4. Cota del embalse en m.s.n.m



Gráfica 5. Cota del Rio Negro aguas abajo de la Represa de Palmar en m.s.n.m

4.3 Elección de la pendiente.

La pendiente S_0 se selecciona por las habilidades de nado de las especies objetivo, debido a la relación de este parámetro con la velocidad del flujo. La bibliografía recomienda no superar una pendiente de 10%. Sin embargo, dada la experiencia de una escala de peces instalada en Igarapava en Brasil, y considerando la altura a superar se elige una pendiente bastante menor, de 5% asegurando bajas velocidades del flujo que serán verificadas para esta pendiente con los resultados del *software Fish Path*.

4.4 Elección del caudal.

El caudal por el paso será entre 1% y 5% del caudal medio anual del río (Larinier, 2002), otros autores afirman que la relación de descarga por el paso y la descarga del río debería ser inversa, siendo los porcentajes menores para los ríos con mayores descargas, incluso menores que el 1% para ríos grandes, específicamente un mínimo de 0,04% para lo que considera como pasos de peces totalmente funcionales (Wolter & Schomaker, 2019).

Considerando que actualmente la empresa energética U.T.E. posee los derechos del agua y que disponen del agua exclusivamente para la generación de energía, es conveniente diseñar el paso para un buen funcionamiento con la menor descarga posible.

Para seleccionar un caudal adecuado se tienen en cuenta las recomendaciones anteriores. Por un lado, la tabla 6 recomienda para un ancho de ranura de 0,3 m un caudal de $0,41 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Este valor es prácticamente idéntico a la recomendación citada anteriormente de 0,04% del caudal del río, por lo que se considera este caudal mínimo para el correcto funcionamiento del paso. También se toma en cuenta el caudal de $0,71 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ del paso de escotaduras verticales de Igarapava. A efectos del diseño se selecciona un caudal de $0,70 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para asegurar un buen caudal de llamada o de atracción.

4.5 Resultado del diseño con *Fish Path*.

Se introducen en el software *Fish Path* los datos iniciales mencionados anteriormente. Se obtienen los siguientes parámetros de diseño:

- Ancho de la piscina $B=1,66 \text{ m}$
- Longitud de la piscina $L=2,05 \text{ m}$
- Longitud total de escala $L_{\text{tot}}=664 \text{ m}$
- Número de piscinas $n=324$

El resto de las dimensiones se obtienen como una proporción de las dimensiones ya determinadas (Puertas et al., 2012), y de un margen de seguridad para la altura de la piscina de 0,24 m

- Deflectores largos $D=0,40 \text{ m}$
- Deflectores cortos $d=0,14 \text{ m}$
- Altura de la piscina 2,50 m

En la ilustración 25 podemos ver que para este diseño de escala se obtiene una velocidad máxima en hendidura de $0,96 \text{ m s}^{-1}$ y una velocidad del flujo principal de $0,86 \text{ m s}^{-1}$ validando la elección de la pendiente del 5%. Al comparar estas velocidades con las velocidades prolongadas y sostenidas para el bagre amarillo de 19cm (que corresponde a un pez cercano a la primera maduración), son entre 0.95m/s y 1.23m/s y menor a 0.95 m/s respectivamente (Santos et al., 2008), vemos que las velocidades que se darán en la escala son muy cercanas a la velocidad sostenida del bagre amarillo, lo cual es un criterio de diseño buscado dada la gran longitud total del paso y teniendo en cuenta que el resto de las especies migradores tienen mejores habilidades de nado que el bagre amarillo.

Datos iniciales

Altura obstáculo: m Pendiente (i): %

Anchura hendidura (b): m Caudal (Q): m³/s

Modelo de piscina: 

Coefficiente C:
Es un coeficiente corrector por caudal y especie
El coeficiente C aplicado es = 1
Si quiere introducir un valor para el coeficiente C:

Especie objetivo:

Ciprínido  Salmónido 

Boga del Tajo Trucha común

Barbo Común Barbo del Mediterraneo

Talla mm

Parámetros de diseño

Dimensiones geométricas

Longitud Piscina (L): 2,05 m. Longitud escala (L_e): 664 m.

Anchura piscina (B): 1,66 m. Número tramos (n): 324

Parámetros Hidrodinámicos

Calado (y): 2,26 m.

Velocidad máxima hendidura: 0,96 m/s

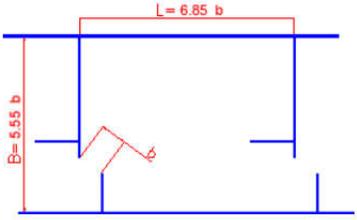
Velocidad flujo principal: 0,86 m/s

Necesidades de Autonomía

Autonomía de hendidura: 1,2 m.

Autonomía escala: 797,04 m.

Resumen



Q: 0,7 m³/s
i: 5 %
y: 2,26 m.
L: 2,05 m.
B: 1,66 m.
b: 0,3 m.

Ilustración 24. Resultados de diseño de la escala de escotaduras verticales con Fish Path.

4.6 Entrada al paso de peces

La entrada de los peces al paso se deberá ubicar donde los peces se concentran. En el caso de Palmar los peces se concentran en el área de influencia de las descargas de las turbinas. Por lo tanto, la entrada del paso se deberá ubicar de manera tal que los peces de seguir la corriente sean atraídos hacia la entrada del paso y así entren. La dirección de la corriente de llamada deberá tener un ángulo máximo de 45° con la corriente del río. Teniendo en cuenta las especies migradoras Surubí y Patí que nadan por el fondo, se deberá vincular la salida del paso de peces con el fondo con una rampa de piedras con una pendiente máxima de 1:2 (Ilustración 26). La velocidad de la corriente en la entrada del paso deberá estar dentro del rango de 0.8 a 2 m s^{-1} .

La posición más adecuada para la entrada al paso de peces es en la margen izquierda, cercana a la salida de las turbinas como muestra la ilustración 27.

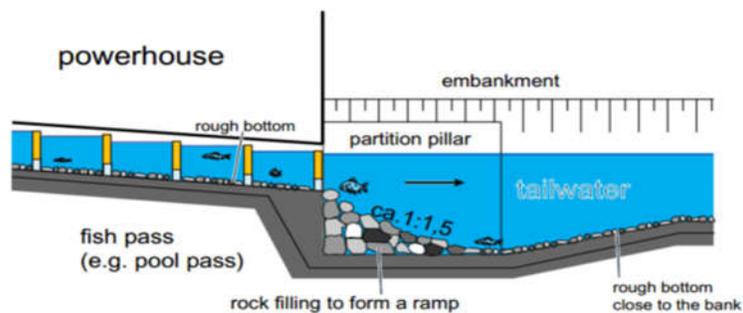


Ilustración 25. Rampa de piedras conectando la entrada del paso con el fondo del río. Fuente Marmulla et al. 2002.

El percentil 80 de la cota del nivel del río aguas debajo de la represa, para los días considerado dentro del rango percentil 10 a percentil 80 de la cota del embalse para los meses de migración es de 9,45 m.s.n.m., por esto se considera un primer tramo de escala de aproximadamente 53 m de largo para asegurar que este tramo de la escala quede alineada con el flujo del río.



Ilustración 26. Represa de Palmar con ubicación del área de las turbinas

4.7 Salida del paso de peces.

La salida del paso (es decir, donde el pez sale aguas arriba, hacia el embalse) tiene que estar lo suficientemente separada de la toma de las turbinas para que los peces que salen del paso no sean arrastrados hacia las turbinas por la corriente. Se deberá mantener una distancia mínima de 5 m entre la salida del paso y la toma de las turbinas. Si la velocidad de la corriente a la salida del paso es mayor que 0.5 m s^{-1} entonces se deberá prolongar la salida del paso hacia aguas arriba.

Dada la variabilidad de la cota del embalse, se analizan las cotas para los meses con presencia de peces migradores aguas debajo de la represa, que son los meses de septiembre a marzo y se obtienen el percentil 80 de 40,02 m.s.n.m. y el percentil 10 de 37,36 m.s.n.m., una diferencia de 2,66 m para la que el paso de peces debe tener un funcionamiento óptimo. El gráfico 6 confirma gráficamente esta elección de rango de funcionamiento.

Se utiliza la ecuación 1 para obtener la tabla 8 donde se observa que para tener un caudal mayor o igual que $0,41 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ el calado deberá ser mayor o igual que 1,32 m.

Tabla 7. Variación del caudal con la variación del calado para el diseño de escotadura vertical elegido.

Q (m ³ /s)	C _q	g (m/s ²)	S	L (m)	b (m)	hc (m)
0,70	1,03	9,8	0,05	2,05	0,3	2,26
0,62	1,03	9,8	0,05	2,05	0,3	2
0,56	1,03	9,8	0,05	2,05	0,3	1,8
0,53	1,03	9,8	0,05	2,05	0,3	1,7
0,50	1,03	9,8	0,05	2,05	0,3	1,6
0,46	1,03	9,8	0,05	2,05	0,3	1,5
0,43	1,03	9,8	0,05	2,05	0,3	1,4

Por ende, la variación máxima de la cota del embalse para un buen funcionamiento de la escala es de 0,86 m, mucho menor que la variación de 1,4 m mencionada anteriormente, por lo que para que la escala funcione correctamente se deben contemplar tres compuertas regulables como las de la ilustración 28.

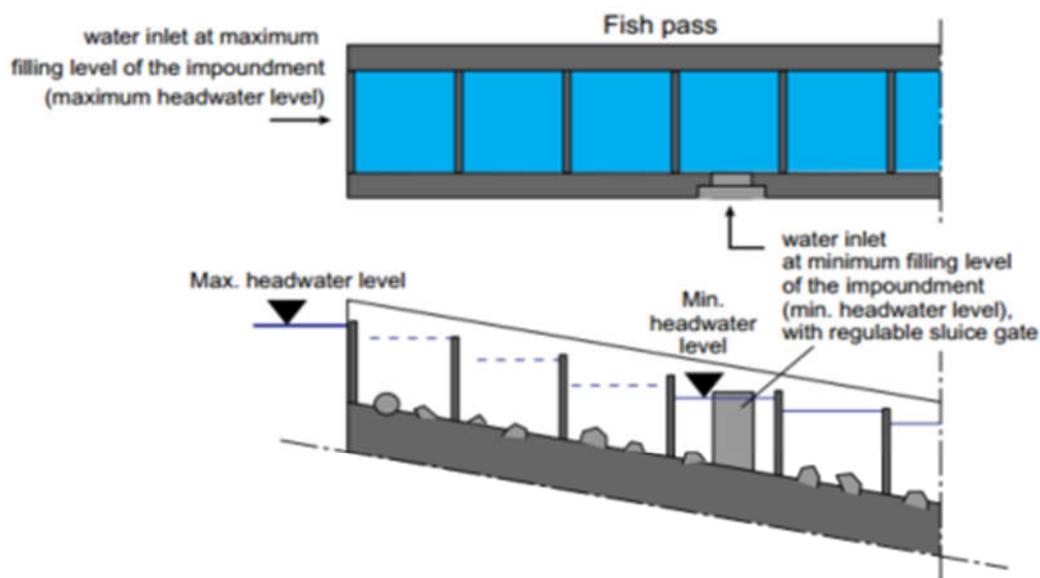
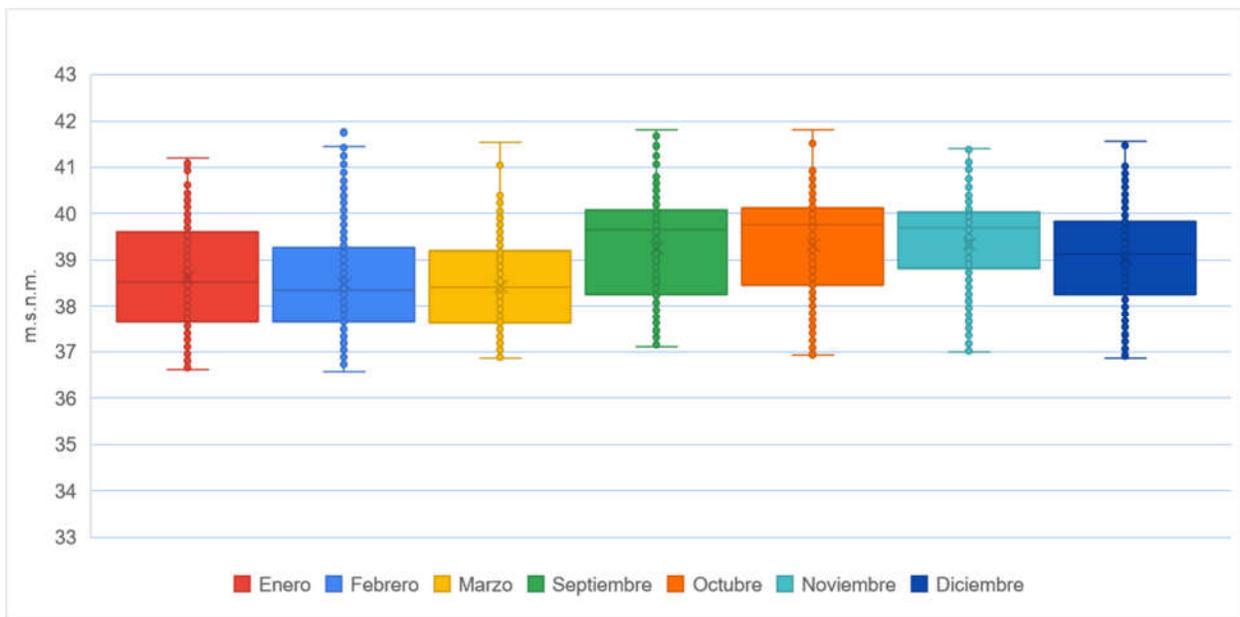


Ilustración 27. Compuertas regulables para variar la cota de la salida de los peces en función de la cota del embalse. Fuente Marmulla et al. 2002.

La última salida será la de la piscina n° 324 y atenderá el rango de cota del embalse desde 40,02 m.s.n.m. – 39,16 m.s.n.m. donde deberá abrirse la segunda salida (primera compuerta) para

augmentar nuevamente el caudal a $0,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y el calado a 2,26 m, y así sucesivamente hasta una cuarta salida (tercera compuerta) que atenderá el rango de cota del embalse desde 38,30 m.s.n.m. hasta la cota percentil 10 mencionada anteriormente de 37,36 m.s.n.m., teniendo para este escenario un caudal de $0,41 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y un calado de 1,32 m.

Para determinar la posición de cada salida, se vuelve a utilizar el software *Fish Path*, cambiando la altura del obstáculo por los siguientes valores 32,34 m, 31,48 m y 30,62 m que surgen de restar 0,86 m de la altura de diseño. La ilustración 29 muestra que las compuertas se deberán instalar en las piscinas número 316, 308 y 299 (ver planos).



Gráfica 6. Cotas del nivel del embalse del periodo 2000-2022, para los meses de migración.

Parámetros de diseño		Parámetros de diseño	
Dimensiones geométricas		Dimensiones geométricas	
Longitud Piscina (L): 2,05 m.	Longitud escala (L): 646,8 m.	Longitud Piscina (L): 2,05 m.	Longitud escala (L): 629,6 m.
Anchura piscina (B): 1,66 m.	Número tramos (n): 316	Anchura piscina (B): 1,66 m.	Número tramos (n): 308
Parámetros Hidrodinámicos		Parámetros Hidrodinámicos	
Calado (y):	2,26 m.	Calado (y):	2,26 m.
Velocidad máxima hendadura:	0,96 m/s	Velocidad máxima hendadura:	0,96 m/s
Velocidad flujo principal:	0,86 m/s	Velocidad flujo principal:	0,86 m/s
Necesidades de Autonomía		Necesidades de Autonomía	
Autonomía de hendadura:	1,2 m.	Autonomía de hendadura:	1,2 m.
Autonomía escala:	777,36 m.	Autonomía escala:	757,68 m.
Parámetros de diseño		Parámetros de diseño	
Dimensiones geométricas		Dimensiones geométricas	
Longitud Piscina (L): 2,05 m.	Longitud escala (L): 612,4 m.	Longitud Piscina (L): 2,05 m.	Longitud escala (L): 612,4 m.
Anchura piscina (B): 1,66 m.	Número tramos (n): 299	Anchura piscina (B): 1,66 m.	Número tramos (n): 299
Parámetros Hidrodinámicos		Parámetros Hidrodinámicos	
Calado (y):	2,26 m.	Calado (y):	2,26 m.
Velocidad máxima hendadura:	0,96 m/s	Velocidad máxima hendadura:	0,96 m/s
Velocidad flujo principal:	0,86 m/s	Velocidad flujo principal:	0,86 m/s
Necesidades de Autonomía		Necesidades de Autonomía	
Autonomía de hendadura:	1,2 m.	Autonomía de hendadura:	1,2 m.
Autonomía escala:	735,54 m.	Autonomía escala:	735,54 m.

Ilustración 28. Resultados de diseño de Fish Path con alturas de 32,34 m, 31,48 m y 30,62 m respectivamente.

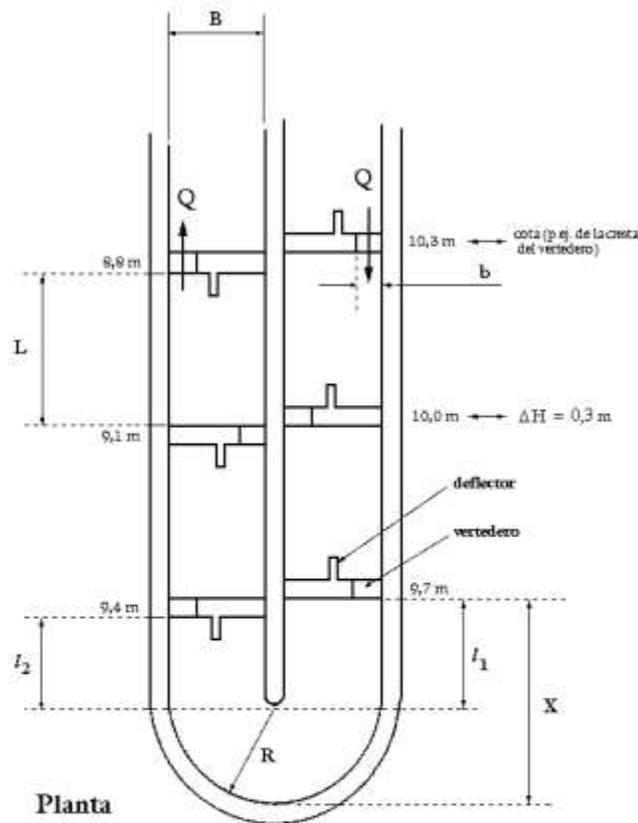
4.8 Piso del paso de peces.

El piso del paso de peces deberá de cubrirse en toda su extensión con una capa de 0.2m de espesor de sustrato grueso. Idealmente el sustrato a utilizar debe ser el típico del río para así naturalizar lo máximo posible el paso de peces, lograr un piso resistente a la erosión y lograr un

mosaico de intersticios para que pequeños peces, peces jóvenes e invertebrados puedan utilizar estos espacios donde la corriente es baja y poder ascender protegidos de la corriente.

4.9 Curvas.

Dependiendo del terreno y de la disposición del paso de peces se deberán construir curvas que cumplan con los criterios de la ilustración 30.



$$X \approx L$$

$$l_1 + l_2 \approx L$$

$$R \approx B \text{ (evitar ángulos rectos)}$$

Ilustración 29. Criterios de artesa en curva. (Fuente: Martínez de Azagra, 1999)

4.10 Compuertas de cierre, recorrido de la escala y muros de contención.

El recorrido de la escala es el resultado de superponer el largo total obtenido del diseño con *Fish Path*, sobre una foto satelital escalada. Se evitó tener que atravesar el talud de la represa en la zona del embalse por los peligros asociados a crecidas en este tipo de intervención.

Se deberán construir dos muros de contención de hormigón que contengan la escala, desde que la escala atraviesa por un túnel la ruta 55 (que es la continuación del talud de la represa) hasta el final de esta dentro del embalse, manteniendo la cota del talud de 45,5 m.s.n.m., y tendrá un alto variable absorbiendo la variación de nivel del suelo. El terreno se desmontará o se rellenará según el nivel del terreno, respetando las alturas necesarias para mantener la pendiente de 5% de la escala. El muro evitará que el agua entre a la escala por cualquier parte del recorrido dentro del embalse, en vez de la compuerta adecuada, también permitirá cerrar la escala cuando la cota supere los 40,02 m.s.n.m. que es la máxima cota para la cual está diseñada y mantener la cota máxima de 45,5 m.s.n.m del talud de la represa por seguridad. En el final de la escala, habrá una compuerta para que se cierre cuando el nivel del embalse sea superior a 40,02 m.s.n.m. o cuando sea necesario para realizar mantenimientos entre otras maniobras.

Aguas debajo de la represa, se deberá estudiar la construcción de un muro de contención para asegurar que el tramo de la escala que se encuentra expuesto a la descarga de las turbinas, en particular el tramo perpendicular al río resista el embate del agua. La primera piscina también contará con una compuerta para poder cerrar la entrada al paso de peces (ver planos).

5. Estudio de la eficiencia de la solución propuesta.

¿Es una mejora ambiental la construcción de un paso de peces en la represa de Palmar? O más directamente, ¿Puede tener consecuencias ambientales negativas la construcción de un paso de peces en la Represa de Palmar? Se argumenta que los pasos de peces pueden ser trampas ecológicas (Pelicice & Agostinho, 2008), reubicando peces en zonas no aptas para el reclutamiento y poniendo en riesgo las ya afectadas poblaciones.

Para responder estas preguntas y validar la construcción, se definen dos estudios necesarios, la evaluación de la eficiencia del paso de peces y la evaluación de las poblaciones.

5.1 Evaluación de la eficiencia del paso de peces.

Se deberá monitorear el paso de peces para evaluar la eficiencia. Típicamente se utilizan las siguientes fuentes de información para cerciorarse de la efectividad del paso de peces:

- Estudios de pesca eléctrica
- Conteos de frezaderos
- Registros de pescadores
- Estudios de seguimiento
- Estudios con trampas
- Contadores de peces
- Video monitoreo
- Registros de mortalidad de peces
- Observaciones directas del movimiento de los peces

De todas estas técnicas, se elige una combinación de estudios de seguimiento y estudios con trampas.

Para el estudio de seguimiento se utilizará el método de captura, marcaje y registro con *PIT Tags*. Las *PIT tags* son dispositivos de identificación de radio frecuencia, encapsulados en vidrio de 2,03 mm de diámetro y de 12,5 mm de largo (Ilustración 31). Son pasivas, es decir no tienen una fuente de energía interna por lo que su funcionamiento es igual a su vida útil que es de 15 años o más. Se energizan al atravesar un campo magnético generado por las antenas del sistema de

monitoreo emitiendo un código alfanumérico único al lector, el cual es registrado por el sistema junto a la fecha, hora y sitio de detección (Prentice et al., 1990).

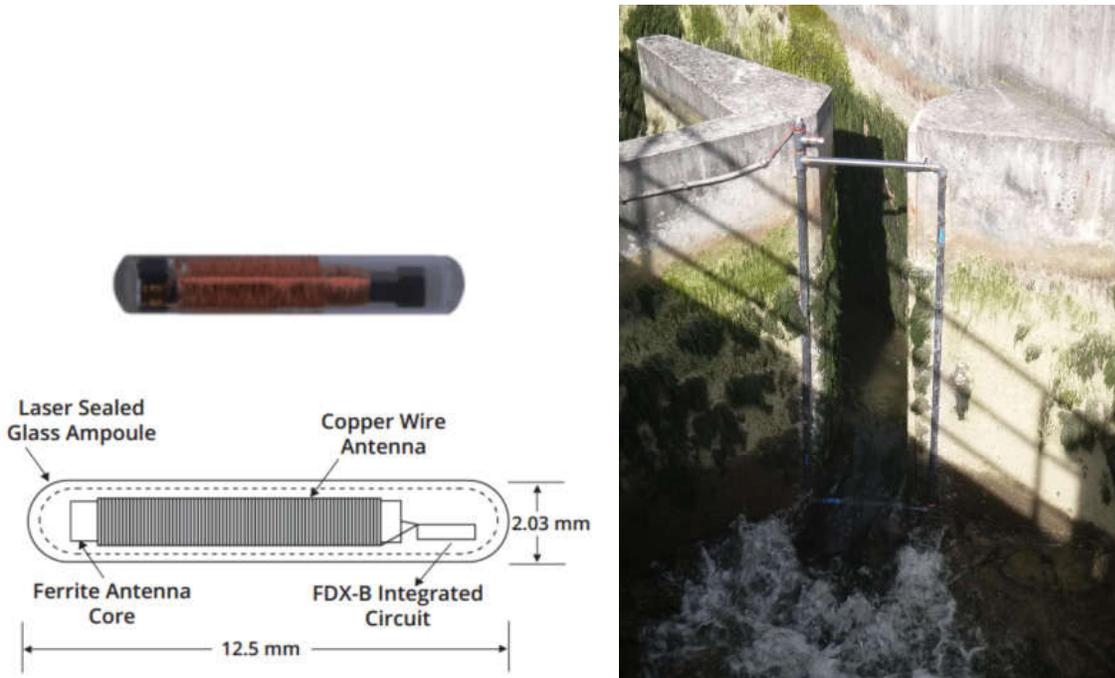


Ilustración 30. Izquierda: PIT Tag; derecha: Antena. (Fuente: Biomark y Profish)

Se deberán instalar dos antenas (Ilustración 31), una a la entrada del paso y otra a la salida, para así poder evaluar el tiempo que necesitan los individuos para atravesar el paso.

Se deberán capturar varios cientos de peces, antes y durante la época de migración mediante pesca eléctrica en zonas someras, con redes en zonas entre 1 y 4 m de profundo y trampas en playas tendidas de hasta 2m de calado. Una vez capturados se deberán marcar con las *PIT tags*, registrar y soltarlos.

En segundo lugar, como obviamente no se van a marcar todos los peces que usarán el paso, se realizarán estudios periódicos mediante trampas a la salida del paso de peces, en la última piscina en el embalse. Se requiere de especial cuidado con la manipulación de los peces atrapados. Para evitar que los peces se lastimen por hacinamiento se deberá realizar vaciados frecuentes de las trampas. Al retirar los peces de la trampa se deberá registrar especie, tamaño

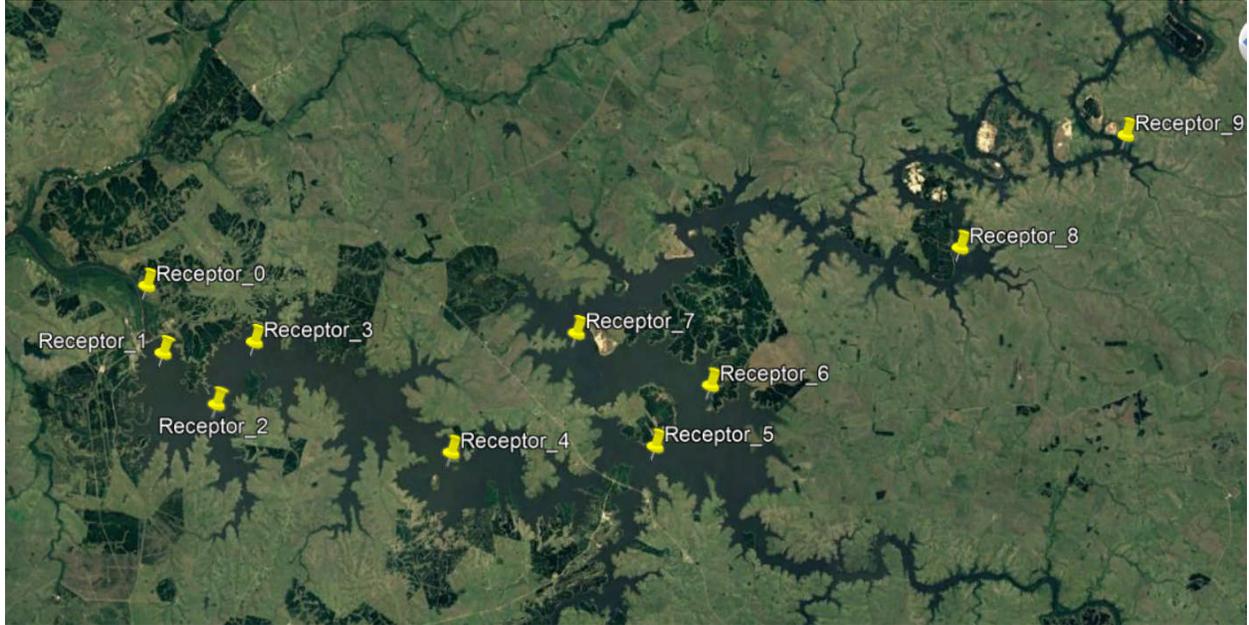
y estado de maduración sexual. Dependiendo de los demás estudios, se podrán marcar los peces previo a la suelta en el embalse.

Teniendo en cuenta la turbidez del río Negro, se descartan los sistemas de conteo automático ya que a pesar de que hay proveedores que afirman ofrecer sistemas que funcionen con aguas turbias, han faltado en especificar los límites de turbidez para el correcto funcionamiento de sus sistemas.

5.2 Evaluación de las comunidades de peces.

Para evaluar la comunidad de peces, se deberán hacer campañas de pesca eléctrica en zonas someras en puntos representativos, con redes en zonas entre 1 y 4 m de profundidad y trampas en playas de hasta dos metros de profundidad. Se deberán realizar antes de la obra y se deberá repetir al año siguiente y a los dos años. Exactamente en la misma época, cuando los juveniles de las especies principales están bien desarrollados y se pueden coger bien (es decir, no se hace en época del desove, mejor después de 2 o 3 meses de desarrollo). (mediante pesca eléctrica en zonas someras en puntos representativos, y también redes en zonas entre 1 y 4 m de profundo -número de peces o superficie según la extensión y la disponibilidad de pescadores-, y trampas en playas tendidas de hasta 2m de calado). Las campañas de pesca se deberán de realizar aguas debajo de la represa, en el Río Yí y en el Arroyo Grande.

Antes de las obras, se deberán hacer campañas de captura y marcado de peces con *tags* acústicos, colocando receptores aguas abajo de la represa de Palmar, en el embalse, en el río Yí, en el arroyo Grande y aguas abajo de la represa de Baygorria. Luego, los peces capturados, marcados y recuperados se deberán soltar aguas arriba del embalse simulando un paso exitoso por el paso de peces. Este estudio busca investigar si de transitar exitosamente el paso de peces las especies migradoras encuentran ambientes aptos, alcanzando y repoblando sitios clave como el río Yí y el Arroyo Grande sur o si por el contrario se acumulan aguas abajo de la siguiente represa (Baygorria) o, en el peor de los casos, se desorientan por haber ingresado a un gran ambiente léntico y vuelven río abajo posiblemente atravesando las turbinas.



Il·lustració 31. Distribució de receptors acústics. (Font: Google Earth)

6. Presupuestos estimados.

En términos de ingeniería civil, la mayoría de las construcciones de paso de peces son proyectos pequeños, pero se realizan en ambientes de alto riesgo, ya sea por difícil acceso, sujeto a eventos de inundación, filtración de agua en las obras entre otras dificultades. Estos factores usualmente hacen que la construcción de un paso de peces sea bastante más cara que un proyecto civil en un ambiente menos riesgoso.

6.1 Presupuesto estimado de retiro de la represa.

Para realizar un presupuesto estimado del costo del retiro de la Represa de Palmar, se utiliza una estimación obtenida de realizar un modelo de regresión lineal que estima el costo de retiro de las represas en función de su altura y su largo. Para esto utilizaron aproximadamente los costos de retiro para 205 represas en Estados Unidos. Obtuvieron un rango entre US\$ 22.331 y US\$ 30.620 por pie vertical (Blachly & Uchida, 2017).

También se actualizaron los precios utilizando el *Turner Building Cost Index* de 2017 a 2022. El índice toma en cuenta los costos de mano de obra, precio de materiales y otros factores del mercado. Se desprende de la tabla 6 que el ajuste a realizar es un aumento de un 23,6%.

Tabla 8. Turner Building Cost Index. (Fuente: <https://www.turnerconstruction.com/cost-index>)

Quarter	Index	Δ%
2nd Quarter 2022	1283	2.23
1st Quarter 2022	1255	2.03
4th Quarter 2021	1230	1.91
3rd Quarter 2021	1207	1.68

Year	Average Index	Δ%
2021	1199	1.9
2020	1177	1.8
2019	1156	5.5
2018	1096	5.6
2017	1038	5.0
2016	989	4.8
2015	943	4.5
2014	902	4.4
2013	864	4.1
2012	830	2.1
2011	812	1.6
2010	799	-4.0
2009	832	-8.4

Se obtiene el rango de costos de USD 2.059.030 – USD 2.823.317 para el retiro de la Represa de Palmar. En la tabla 10 se muestran los costos por pie de altura que se utilizaron para la estimación, actualizando los valores recomendados por el índice TBCI.

Tabla 9. Costos de retiro de la Represa de Palmar.

Altura de Represa de Palmar (Salto neto en pies)	Costo mínimo por pie en USD (Fuente: Ben Blachly & Emi Uchida, 2017)	Costo máximo por pie en USD (Fuente: Ben Blachly & Emi Uchida, 2017)	Estimación mínima en USD USD ajustado por TBCI 23,6%	Estimación máxima en USD ajustado por TBCI 23,6%
90	22.331	30.620	2.484.100	3.406.169

6.2 Presupuesto estimado de canal naturalizado o *tipo by-pass*.

Para realizar un presupuesto estimado para la realización de un canal naturalizado se utilizan los estimados de EUR 32.000 – EUR 45.000 por metro vertical. Estos valores se ajustan por el *Construction Cost Index (CCI)*, que como se observa en la Tabla 8 tiene un aumento de 35%. Se obtiene el rango de costos de EUR 1.339.200 – EUR 1.883.250 para la construcción del canal naturalizado. En la tabla 12 se muestran los costos por metro de altura que se utilizaron para la estimación, actualizando los valores recomendados por el índice CCI, que considera los costos de construcción de edificios residenciales.

Tabla 10. *Construction Cost Index*. (Fuente: Eurostat)

↑↓	⊗	TIME	2009-Q2 ↓	2022-Q2 ↓
		GEO ↓		
		Spain	95.8	128.3 (P)

Tabla 11. Costo de la construcción del canal naturalizado para paso de peces por Palmar.

Diferencia de cotas (m)	Costo mínimo por metro en EUR (Fuente: Larsson and Sparrevik, 2009)	Costo máximo por metro en EUR (Fuente: Larsson and Sparrevik, 2009)	Costo mínimo por metro ajustado por CCI en Euros	Costo máximo por metro ajustado por CCI en Euros	Estimación mínima en Euros ajustado por CCI	Estimación máxima en Euros ajustado por CCI
31	32.000	45.000	43.200	60.750	1.339.200	1.883.250

6.3 Presupuesto estimado de escotaduras verticales.

Al igual que para el canal naturalizado, se utiliza el estimado de EUR 91.000 por metro vertical, y se ajusta por el índice CCI entre 2022 y 2006 que como se puede inferir de la tabla 13 da un aumento de 50%. Por ende, una primera aproximación al costo estimado para el paso de escotaduras verticales es de EUR 4.231.500.

Tabla 12. Construction Cost Index (Fuente: Eurostat)

↑↓	⊗	TIME	2006-Q2 ↓	2022-Q2 ↓
		GEO ↓		
		Spain	85.5	128.3 (P)

Tabla 13. Primera aproximación del costo del paso de peces de escotaduras verticales.

Diferencia de cotas (m)	Costo por metro en Euros (Fuente: Laine, 2006)	Costo por metro en Euros aumentado 50% por CCI	Estimación del costo del paso de escotaduras verticales en Euros
31	91.000	136.500	4.231.500

Se realiza una segunda aproximación utilizando el valor de UYU 34.000 por metro cúbico de muro de contención, tomado de una constructora de Montevideo. Se le aplica un factor de un aumento del 50% por distancia del sitio y demás imprevistos quedando en UYU 51.000 por metro cúbico. Además, se calculan los metros cúbicos necesarios para la construcción de la escala a la que también se le agrega un 50% más por desperdicios e imprevistos obteniendo un valor de 2.593 m³ de hormigón. En la tabla 15 se presentan los resultados donde se observa un costo aproximado de EUR 3.245.951, que está en un rango similar a la aproximación anterior validando el estimado del costo.

Tabla 14. segunda aproximación del costo del paso de peces de escotaduras verticales.

Volumen Hormigón (m3)	Costo por metro cúbico de muro de contención en UYU	Costo aproximado en UYU	Estimación del costo del paso de escotaduras verticales
2593	51.000	132.243.000	3.245.951

6.4 Presupuesto estimado de estudios de eficiencia.

Se realiza un presupuesto estimado para la evaluación de la eficiencia del paso de peces. Principalmente consta del costo de los estudios de seguimiento mediante PIT tags. La tabla 16

muestra los componentes principales necesarios para este estudio. Se estima un aproximado de EUR 18.534.

Para la evaluación de las comunidades de peces, el costo será principalmente del seguimiento con tags acústicos. Para estimar un aproximado se toma del *United States Army Corps of Engineers* el costo de entre 2.000.000 y 3.000.000 de euros al año.

Tabla 15. Presupuesto estimado de evaluación de la eficiencia del paso de peces.

	cantidad	Euros/unidad	Subtotal Euros
PIT tags	1000	3,47	3470
Antena y lector	2	5677	11354
Data Logger	2	280	560
Lector Portable	1	1000	1000
Pistola de implante	3	50	150
Ayuda instalación	1	2000	2000
TOTAL			18534

7. Conclusiones.

Como se ha descrito en este trabajo, los dispositivos de pasos de peces del tipo escala de escotaduras verticales y de canal naturalizado o *by-pass* dan solución y respuesta al problema que representa la represa de Palmar, en el Río Negro, Uruguay, al ser una barrera infranqueable para el movimiento de los peces hacia aguas arriba y en particular de los peces migradores. La construcción de cualquiera de estos pasos permitiría la repoblación del Río Negro hasta la Represa de Baygorria, del Río Yí y del Arroyo Grande, sitios que históricamente tuvieron especies de peces migradores, pero que después de 40 años de operación de la represa se han extinguido.

Si bien la conservación y restauración de las especies es un deber ético, es interesante destacar que para Uruguay la pesca deportiva genera un movimiento estimado de EUR 43.400.000 al año (Schuller, 2018), además es un sector importante del ecoturismo que recientemente tuvo un rápido crecimiento y es apoyado por el Ministerio de Turismo bajo la marca Uruguay Natural.

Como se pudo observar en este trabajo, se estudió en mayor profundidad la opción de paso de peces de escotaduras verticales por su mayor viabilidad, al no necesitar usar terrenos privados. Sin embargo, se presenta la alternativa del canal naturalizado por tener un mayor alcance en las especies de la que permite su paso, como el caso particular de la Raya que pasaría por el canal naturalizado, pero no así por el paso de escotaduras verticales.

Como es bien sabido, la implementación de un paso de peces no termina en su construcción y operación, sino que es imprescindible el monitoreo de este. En este trabajo se describen los estudios necesarios para evaluar la efectividad del paso de peces, y como hacer un seguimiento de las poblaciones de los peces, para así poder realizar correcciones de ser necesarias y además considerar la pertinencia de la construcción de otros pasos de peces en las otras dos represas del Río Negro.

Por tanto, queda demostrado que la posible construcción de un paso de peces en la Represa de Palmar no solo es una opción viable y ambientalmente necesaria para revertir parcialmente el impacto ecológico causado por la construcción de Represas en territorio uruguayo, sino que también podría traer beneficios a las comunidades al recuperar actividades económicas como la pesca e impulsar otras como el turismo de pesca deportiva.

8. Bibliografía

- Agostinho, A. A., Gomes, L. C., Fernandez, D. R., & Suzuki, H. I. (2002). Efficiency of fish ladders for neotropical ichthyofauna. *River Research and Applications*, 18(3), 299–306. <https://doi.org/10.1002/rra.674>
- Aramburu, E., Lara, Á., Morcillo, F., Castillo, M., & Berges, J. A. (2016). *Escalas de peces de hendidura vertical*. Centro de publicaciones, Ministerio de Fomento.
- Ares, L., Spinetti, M., & Foti, R. (2008). *Diagnóstico del Estado de los Recursos Pesqueros del Lago Artificial de Palmar*. 77.
- Blachly, B., & Uchida, E. (2017). *Estimating the Marginal Cost of Dam Removal*. 11.
- Brazeiro, A., & Universidad de la República (Eds.). (2015). *Eco-regiones de Uruguay: Biodiversidad, presiones y conservación: aportes a la Estrategia Nacional de Biodiversidad* (Primera edición). Facultad de Ciencias, UDELAR, Universidad de la República.
- Carolsfeld, J., Harvey, B., Ross, C., & Baer, A. (2003). *Migratory Fishes of South America. Biology, Fisheries and Conservation Status*. 383.
- Delfino, R., & Baigún, C. (1985). Marcaciones de Peces en el Embalse de Salto Grande, Río Uruguay (Argentina-Uruguay). *Natura Neotropicalis*, 1(16), 85–93. <https://doi.org/10.14409/natura.v1i16.3458>
- Evenden, M. (2000). Salmon, Science, and the Fraser River, 1938-1948. *BC STUDIES*, 36.
- García de Leaniz, C., & De la Fuente, J. (2018). *Fish Passes: A brief Introduction*. 99.

- Larinier, M. (2002). LOCATION OF FISHWAYS. *Bulletin Français de La Pêche et de La Pisciculture*, 364 supplément, 39–53. <https://doi.org/10.1051/kmae/2002106>
- Lira, N. A., Pompeu, P. S., Agostinho, C. S., Agostinho, A. A., Arcifa, M. S., & Pelicice, F. M. (2017). Fish passages in South America: An overview of studied facilities and research effort. *Neotropical Ichthyology*, 15(2). <https://doi.org/10.1590/1982-0224-20160139>
- Mader, H., Brandl, A., & Käfer, S. (2020). Design and Function Monitoring of an Enature® Vertical Slot Fish Pass in a Large Potamal River in Carinthia/Austria. *Water*, 12(2), 551. <https://doi.org/10.3390/w12020551>
- Mallo, M., Reolón, L., Hill, M., Cervetto, G., & Martínez, J. (2020). *Monitoreo de Calidad del Agua Río Negro-Informe 2019*.
- Marmulla, G., Welcomme, R. L., Food and Agriculture Organization of the United Nations, & Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (Eds.). (2002). *Fish passes: Design, dimensions and monitoring*. Food and Agriculture Organization of the United Nations : Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK).
- Martinez, C., Santos, H., & Pompeu, P. (2009). Estabelecimento de Parâmetros Hidráulicos para Escadas de Peixes do Tipo Ranhura Vertical Baseados em Características de Espécies Neotropicais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 14(1), 99–112. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v14n1.p99-112>
- Martínez-Capel, F., Rodriguez, F. H., Jal, D. G. D., & Lastra, N. (1999). *ASSESSING IMPACTS OF A HYDROPOWER PLANT: EBRO RIVER, SPAIN*. 6.
- Monitoreo de Calidad de Agua de la Cuenca del Río Yí-Informe de datos de calidad de agua superficial-2019*. (2020).

- Mormul, R. P., Thomaz, S. M., Agostinho, A. A., Bonecker, C. C., & Mazzeo, N. (2012). Migratory benthic fishes may induce regime shifts in a tropical floodplain pond: Regime shifts in a tropical floodplain pond. *Freshwater Biology*, 57(8), 1592–1602. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2012.02820.x>
- Oldani, N. O., & Baigún, C. R. M. (2002). Performance of a fishway system in a major South American dam on the Parana River (Argentina-Paraguay): PERFORMANCE OF FISHWAY SYSTEM IN A DAM. *River Research and Applications*, 18(2), 171–183. <https://doi.org/10.1002/rra.640>
- Oldani, N. O., Baigún, C. R. M., Nestler, J. M., & Goodwin, R. A. (2007). Is fish passage technology saving fish resources in the lower La Plata River basin? *Neotropical Ichthyology*, 5(2), 89–102. <https://doi.org/10.1590/S1679-62252007000200002>
- Otheguy, M. (2019, November 20). *Se extinguieron los peces migratorios aguas arriba de la represa de Palmar.*
- Panario, D. (1986). *Geomorfología Uruguay.pdf.*
- Pelicice, F. M., & Agostinho, A. A. (2008). Fish-Passage Facilities as Ecological Traps in Large Neotropical Rivers: *Fish Passages as Ecological Traps. Conservation Biology*, 22(1), 180–188. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2007.00849.x>
- Penczak, T., Agostinho, I A A, & Okada, E. K. (1994). *Fish diversity and community structure in two small tributaries of the Parana River/ Parana Statel Brazil.* 9.
- Prentice, E. F., Flagg, T. A., McCutcheon, C. S., & Brastow, D. F. (1990). *PIT-Tag Monitoring Systems for Hydroelectric Dams and Fish Hatcheries.*
- Puertas, J., Cea, L., Bermúdez, M., Pena, L., Rodríguez, Á., Rabuñal, J. R., Balairón, L., Lara, Á., & Aramburu, E. (2012). Computer application for the analysis and design of vertical

- slot fishways in accordance with the requirements of the target species. *Ecological Engineering*, 48, 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.05.009>
- Santos, Ha., Pompeu, Ps., Vicentini, Gs., & Martinez, Cb. (2008). Swimming performance of the freshwater neotropical fish: *Pimelodus maculatus* Lacepède, 1803. *Brazilian Journal of Biology*, 68(2), 433–439. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842008000200029>
- Schuller, J. (2018). *Aportes al conocimiento de la pesca deportiva en Uruguay*. 66.
- Serra, W. S., Teixeira de Mello, F., Loureiro, M., & Malabarba, L. R. (2014). *Peces del Río Negro*. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Dirección Nacional de Recursos Acuáticos-DINARA.
- Silva, A. T., Lucas, M. C., Castro-Santos, T., Katopodis, C., Baumgartner, L. J., Thiem, J. D., Aarestrup, K., Pompeu, P. S., O'Brien, G. C., Braun, D. C., Burnett, N. J., Zhu, D. Z., Fjeldstad, H.-P., Forseth, T., Rajaratnam, N., Williams, J. G., & Cooke, S. J. (2018). The future of fish passage science, engineering, and practice. *Fish and Fisheries*, 19(2), 340–362. <https://doi.org/10.1111/faf.12258>
- Tundisi, J. G., & Matsumura-Tundisi, T. (2003). Integration of research and management in optimizing multiple uses of reservoirs: The experience in South America and Brazilian case studies. In K. Martens (Ed.), *Aquatic Biodiversity* (pp. 231–242). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1084-9_17
- Veroslavsky, G., Ubilla, M., Martínez, S., Santa Ana, H. de, & Universidad de la República (Uruguay) (Eds.). (2003). *Cuencas sedimentarias de Uruguay: Geología, paleontología y recursos naturales*. DI.R.A.C.

Wolter, C., & Schomaker, C. (2019). Fish passes design discharge requirements for successful operation. *River Research and Applications*, 35(10), 1697–1701.
<https://doi.org/10.1002/rra.3399>



COMPUERTA DE CIERRE DE LA ENTRADA DE LA ESCALA

TERCERA COMPUERTA REGULABLE
 SEGUNDA COMPUERTA REGULABLE
 PRIMER COMPUERTA REGULABLE
 COMPUERTA DE CIERRE DE LA SALIDA DE LA ESCALA



DETALLE ESCALA 1.100



PROYECTO		PASO DE PECES DEL TIPO ESCALA DE ESCOTADURAS VERTICALES	
LAMINA		PLANTA UBICACIÓN	
UBICACIÓN	PALMAR, URUGUAY	LAMINA Nº	A 01
INGENIERO	CARLOS SENDRA	ESCALA	1:500
FECHA	SEPTIEMBRE 2022		

