



Ministerio
de Industria,
Energía y Minería



Ministerio
de Ambiente



BANCO DE DESARROLLO
DE AMÉRICA LATINA



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



FACULTAD DE
INGENIERÍA



imfia



Fundación
Julio Ricaldoni
INGENIERÍA EN EL URUGUAY

EVALUACIÓN Y PERSPECTIVAS DEL USO DEL AGUA PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE Y DERIVADOS EN EL MARCO DE LA HOJA DE RUTA DEL URUGUAY

INFORME FINAL

IMFIA

Mayo de 2025

INDICE

1	INTRODUCCION	4
2	CONCEPTUALIZACIÓN DEL CICLO HIDROLÓGICO.....	5
3	REQUERIMIENTOS DE AGUA DEL HIDRÓGENO VERDE.....	7
3.1	ETAPAS DEL PROCESO DONDE SE CONSUME AGUA	7
3.2	AGUA CONSUMIDA EN EL PROCESO DE ELECTRÓLISIS	7
3.3	AGUA REQUERIDA PARA LA PRODUCCIÓN DE H ₂ SEGÚN CADA TECNOLOGÍA DE ELECTRÓLISIS	7
3.4	CALIDAD DE AGUA REQUERIDA EN CADA ETAPA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN.....	10
3.4.1	<i>Agua ultrapura</i>	<i>10</i>
3.4.2	<i>Agua para refrigeración</i>	<i>12</i>
3.5	PROYECCIÓN DE CONSUMO MEDIO EN URUGUAY AL HORIZONTE 2040.....	13
4	CARACTERIZACIÓN GLOBAL DE LA OFERTA DEL RECURSO HÍDRICO SUPERFICIAL ..	15
4.1	INFORMACIÓN DISPONIBLE.....	15
4.2	METODOLOGÍA	15
4.3	RESULTADOS	18
5	COMPARACIÓN ENTRE OFERTA Y DEMANDA PARA ESCENARIOS DE H₂V.....	22
6	CARACTERIZACIÓN ESPECÍFICA DEL RECURSO HÍDRICO SUPERFICIAL	26
6.1	INFORMACIÓN DISPONIBLE.....	26
6.1.1	<i>Disponibilidad de agua.....</i>	<i>26</i>
6.1.2	<i>Demanda actual del recurso hídrico</i>	<i>28</i>
6.2	METODOLOGÍA	29
6.2.1	<i>(Des)-Naturalización de las series de caudales</i>	<i>29</i>
6.2.2	<i>Definición de indicadores de la “falla”</i>	<i>31</i>
6.2.3	<i>Análisis de sensibilidad a demandas adicionales</i>	<i>33</i>
6.3	RESULTADOS	33
7	ESTUDIOS DE CASO.....	40
7.1	ARAPEY ALTO.....	41
7.2	LAGUNA MERÍN	44
7.2.1	<i>Embalse.....</i>	<i>44</i>
7.2.2	<i>Embalse + Toma directa</i>	<i>46</i>
7.3	PALMAR.....	49

8	PROPUESTA DE RECOMENDACIONES.....	51
9	COMUNICACIÓN DE RESULTADOS.....	53
10	RESUMEN Y COMENTARIOS FINALES.....	54
11	REFERENCIAS	58
	ANEXO I: OFERTA MINIMA CORRESPONDIENTE AL CAUDAL MINIMO	59
	ANEXO II: ANÁLISIS EXPLORATORIO DE LAS SERIES DE CAUDALES DIARIOS	61
	ANEXO III: ESTIMACIÓN DE CAUDALES AMBIENTALES	65
	ANEXO IV: AJUSTE A-V PARA EMBALSES.....	66

1 INTRODUCCION

Este estudio se desarrolla dentro del convenio entre el Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM) y la Fundación Julio Ricaldoni (FJR-FING-UdelaR) titulado “*Evaluación y perspectivas del uso del agua para la producción de hidrógeno verde y derivados en el marco de la Hoja de Ruta del Uruguay*”.

En particular, este documento corresponde al “*Informe Final*”, incluyendo la totalidad de las actividades desarrolladas en el marco del convenio (*Producto 1 y Producto 2*).

Dentro de lo realizado en la *Actividad 1* se incluye:

- Recopilación de antecedentes sobre los requerimientos de cantidad y calidad de agua necesaria para la producción de H₂V según la tecnología aplicada, el tipo de producto final producido y la fuente de agua a utilizar.
- Caracterización global de la oferta del recurso hídrico (superficial y subterráneo) para Uruguay a partir de información disponible proporcionada por la Dirección Nacional de Aguas (DINAGUA) y la Dirección Nacional de Minería y Geología (DINAMIGE). En este documento se presenta la caracterización global del recurso hídrico superficial.
- Comparaciones globales entre la oferta y la demanda del recurso hídrico en escenarios de demanda de H₂V de la Hoja de ruta.

Mientras que en la *Actividad 2* se incluye:

- Caracterización específica de la oferta del recurso hídrico y su potencial uso para la producción de H₂V en Uruguay, contemplando la variabilidad espacial y temporal de la oferta. En este documento se presenta la caracterización específica del recurso hídrico superficial.
- Estudios de caso de producción de H₂V y derivados, incluyendo la evaluación de tres proyectos de escala grande (toma de agua de aproximadamente 7.000 m³/d), tomando de distintas fuentes de agua (superficial, subterránea, embalses o una combinación de las anteriores).
- Generación de insumos técnicos y recomendaciones para los criterios de asignación de derecho de usos de agua.
- Comunicación de resultados, incluyendo un listado de las instancias de reuniones y presentaciones realizadas a lo largo del desarrollo del convenio.

En el proyecto participaron los investigadores del IMFIA: Christian Chreties, Rafael Terra, Alejandra De Vera, Santiago Narbondo y Laura Cantera.

2 CONCEPTUALIZACIÓN DEL CICLO HIDROLÓGICO

En esta sección se repasan los principales conceptos del ciclo hidrológico que orientan a su comprensión y contextualización. Cualquier aprovechamiento de agua introduce algún nivel de modificación en el ciclo hidrológico. Para mejor comprender dicho impacto es necesario tener una comprensión de algunas características particulares del ciclo del agua, que se presentan a continuación.

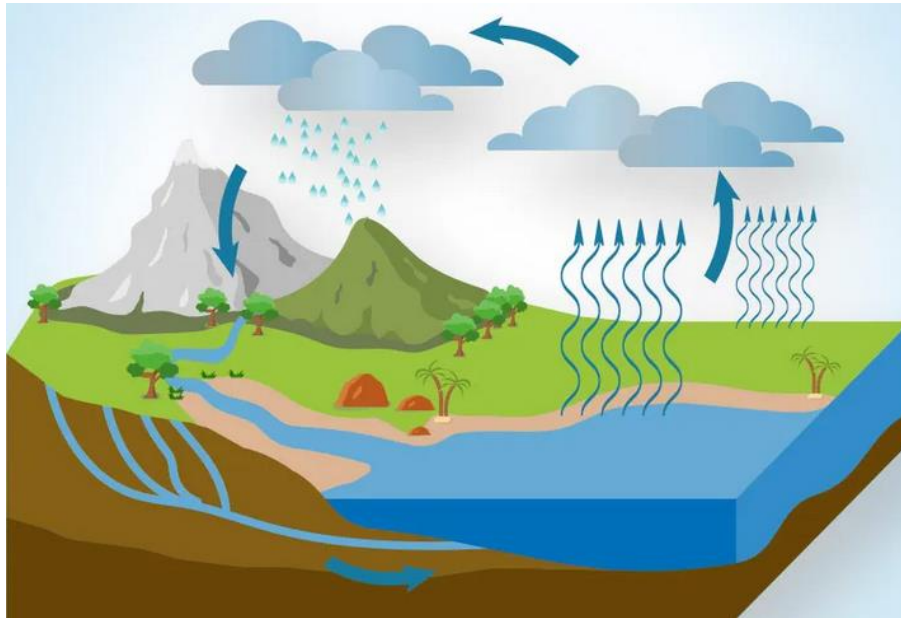


Figura 1: Representación esquemática del ciclo hidrológico.

Por ser un ciclo, es decisivo focalizar el análisis en los *flujos de agua* y no en los reservorios, a riesgo de llegar a conclusiones desacertadas. Los flujos asociados al ciclo del agua vinculan los cuerpos de agua de distinta fase (gaseoso, líquido y sólido) y, dentro de los líquidos, de distinta salinidad. Por ejemplo, el agua salina que se evapora y transporta sobre el continente por la circulación atmosférica, al precipitar pasa a formar parte de cuerpos de agua dulce. El ciclo del agua tiene incluso ramas en que la molécula de agua se rompe. La fotosíntesis combina agua (rompiendo su molécula) con energía solar y dióxido de carbono (CO_2) para sintetizar materia orgánica, liberando oxígeno. La tecnología del hidrógeno hace algo equivalente. En ambos casos, la restitución al ciclo hidrológico ocurre con la oxidación de la molécula sintetizada.

Una clave es reconocer la *velocidad de los diversos flujos de agua* que conforman el ciclo hidrológico. A escala global, el de más rápida reacción, por mucho, es la evaporación, que restituye casi de inmediato cualquier déficit de humedad atmosférico, considerando que buena parte del planeta está cubierto por océanos. Una molécula de agua tiene un tiempo de residencia medio en la atmósfera que se mide en días (de 7 a 10 días).

Otra clave es caracterizar la *variabilidad temporal de los flujos*, que es particularmente notoria en la hidrología superficial pues los flujos son rápidos (evaporación, escurrimientos) y la restitución, en este caso dada por la precipitación, está sujeta a la variabilidad climática. Todos tenemos experiencia de las enormes variaciones en humedad del suelo y caudales de ríos que se sufren en el país. En hidrología subterránea la variabilidad es mucho menor, pues si bien la restitución (recarga) también depende de variabilidad climática, los flujos de agua son mucho más lentos.

Un uso *antrópico “consuntivo”* del agua, por tanto, lo que hace es pasar el agua de un flujo a otro. Por ejemplo, una explotación de riego en base a un pozo, toma del flujo subterráneo y lo distribuye al superficial (el retorno de la chacra de riego), a la atmósfera (evaporación en el sistema de distribución y la chacra) y a la síntesis de materia orgánica de la fotosíntesis.

Un uso *“no consuntivo”*, como la generación hidroeléctrica o en embalses recreativos, regulan el flujo superficial; a su vez también aumentan el flujo a la atmósfera por la evaporación que es mayor en un embalse que en un cauce.

Por tanto, la valoración de un aprovechamiento de agua, y el H2V no es excepción, ha de enfocarse comparando los flujos requeridos con los flujos naturales que se pretende “cosechar”, cuidando que la afectación -al ecosistema y a los aprovechamientos previamente existentes- sea aceptable. Cualquier uso, consuntivo o no, va a distribuir agua entre los diferentes flujos del ciclo hidrológico; más aún, cualquier actividad humana lo hace, es inevitable, el agua “lo atraviesa todo”. Nada de esto implica pérdida o renuncia alguna en la medida que las afectaciones no comprometan los sistemas naturales que dichos flujos sustentan.

Este *balance entre “oferta” natural de agua y demanda (ambiental y antrópica)* es lo que hace rutinariamente la autoridad de aguas (DINAGUA) desde hace décadas para autorizar los aprovechamientos. Al comparar los flujos es crítico considerar la *variabilidad temporal* de los flujos naturales y la *escala temporal de interés*, si son flujos instantáneos o acumulados en un mes o un año, que dependerá de la capacidad de regulación hídrica del aprovechamiento. En la autorización de tomas directas de cursos, por ejemplo, lo que importa son los caudales instantáneos (de estiaje), mientras que en la autorización de embalses, importan los escurrimientos anuales.

Este es el abordaje que se sigue para valorar la potencial demanda de los desarrollos de H2V en Uruguay en el contexto de los recursos hídricos del país y de los aprovechamientos ya existentes.

3 REQUERIMIENTOS DE AGUA DEL HIDRÓGENO VERDE

En este capítulo se presenta una reseña de la revisión bibliográfica realizada sobre el uso del agua en el proceso de producción de hidrógeno verde.

3.1 Etapas del proceso donde se consume agua

Actualmente, existen distintas metodologías para producir hidrógeno. En particular el hidrógeno verde es aquel que se produce mediante la electrólisis del agua, utilizando energías renovables como fuente de energía eléctrica. Mediante la electrólisis del agua (H_2O), se separan el hidrógeno (H_2) y el oxígeno (O_2).

El proceso de producción de hidrógeno verde y sus derivados, utiliza agua en las siguientes etapas:

- Electrólisis
- Refrigerado

A su vez, la cantidad de agua tomada de la fuente es específica de cada sitio y puede variar en función de los siguientes factores:

- Fuente de agua y su calidad
- Tecnología usada en la producción de hidrógeno
- Tecnología de refrigeración

3.2 Agua consumida en el proceso de electrólisis

Según la relación estequiométrica de la reacción, son necesarios 9 L de agua pura para producir 1 kg H_2 . Sin embargo, debido a que el agua debe ser tratada para ingresar al electrolizador y además es utilizada en la refrigeración, la toma de agua necesaria para generar 1 kg de H_2 es mayor que el valor estequiométricamente necesario. Cabe señalar que se consumen (debido a que se transforman en H_2) solamente 9 L/kg H_2 , el agua restante que se toma es devuelta al ciclo hidrológico de forma relativamente inmediata ya sea como evaporación o como efluente del proceso.

3.3 Agua requerida para la producción de H_2 según cada tecnología de electrólisis

Todas las tecnologías de producción de hidrógeno requieren agua (incluyendo también las que no son verdes), ya sea durante la producción (electrólisis) como para la refrigeración. Los

datos de requerimiento de agua para la producción de hidrogeno verde son escasos, debido a que las investigaciones se encuentran en etapas iniciales. Los estudios disponibles se realizaron en laboratorio y no toman en cuenta el agua necesaria para refrigerado (por ejemplo), con lo cual pueden estar subestimando la demanda de agua. Una porción significativa de los datos está basada en modelos industriales y no en mediciones, lo cual no es una práctica común entre los productores de hidrógeno. Los datos presentados a continuación fueron tomados de IRENA (2023) y los mismos se basan en entrevistas con productores de hidrógeno y prestadores del servicio de agua, así como revisión bibliográfica y estudios existentes a nivel de laboratorio.

Las tecnologías de electrólisis utilizadas actualmente para la producción de hidrogeno verde se presentan en la Tabla 1. En la revisión de consumos realizada, se consideran únicamente los electrolizadores de membrana polimérica (PEM) y la electrólisis alcalina (AWE) debido a que estas tecnologías son las más utilizadas y por ende se cuenta con mayor volumen de información acerca de los consumos de agua. En este sentido, se presenta en la Tabla 2, un resumen de las intensidades de toma de agua para producción de hidrogeno verde discriminado según la tecnología utilizada.

Cabe señalar que dichos valores consideran que la fuente de agua de toma es de un curso superficial o de agua subterránea.

Tabla 1: Tecnologías existentes en la producción de hidrógeno verde. (Fuente: IRENA, 2023)

Electrolizadores de membrana polimérica (PEM)	Disponibles a escala comercial
Electrólisis alcalina (AWE)	
Electrolizadores de membrana de intercambio aniónico (AEM)	Escala experimental, no hay datos comerciales disponibles
Óxido sólido	

Tabla 2: Resumen de toma y demanda de agua según las tecnologías de producción de hidrogeno verde (calidad del agua considerada fuente superficial o subterránea). Adaptado de: IRENA, 2023.

Tipo de electrolizador	Intensidad de toma de agua (Tratamiento + Electrólisis + Refrigeración) (L/kgH ₂)		
	Max	Min	Medio
Electrólisis alcalina	36,7	31,9	34,3
Electrólisis PEM	28,5	27,0	27,7

Es de interés observar cómo se distribuye el volumen de agua dentro del proceso de producción de hidrogeno verde. En la Figura 2 se presenta un esquema de distribución del volumen que ingresa, egresa y se consume dentro del proceso de producción de 1 kg de H₂.

Dicho esquema es específico para la tecnología de electrólisis alcalina, y considera además que la fuente del agua que ingresa es superficial o subterránea. En este esquema, se considera además que el sistema de refrigerado es por evaporación y que la eficiencia energética es del 70%. Esto quiere decir que, de la energía necesaria para la electrólisis (45 kWh/kgH₂), 30 % se pierde como calor que es necesario disipar. Para ello, se utiliza un sistema de refrigeración con agua en un circuito semicerrado con torre de enfriamiento, donde parte del agua se pierde por evaporación (1-2 % del agua de circulación).

Cabe destacar que los datos utilizados en este esquema fueron adaptados de IRENA y se basan en modelos ingenieriles diseñados por la industria. A su vez, las cantidades de agua efectivamente demandadas y tomadas de la fuente de agua serán específicas de cada sitio y pueden variar en función de la fuente y calidad del agua de toma y de la tecnología utilizada tanto para la electrólisis como para la refrigeración, como puede apreciarse en la Tabla 2.

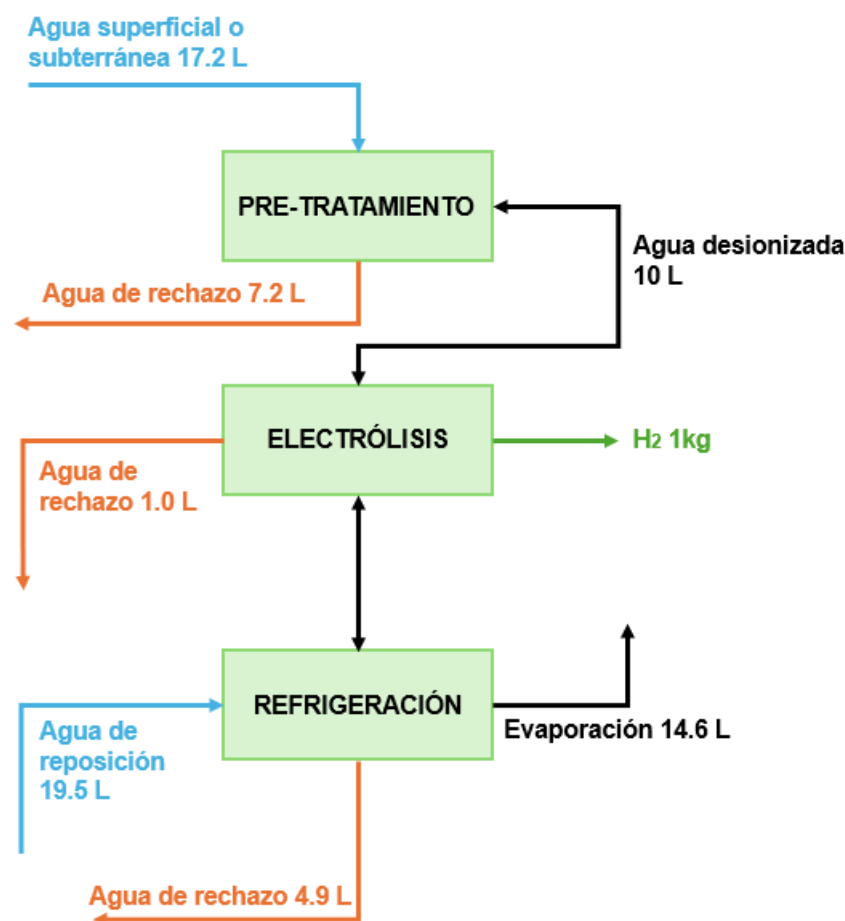


Figura 2: Esquema de extracción y consumo de agua en litros para producir 1 kilogramo de hidrógeno verde (específicamente para electrólisis alcalina). (Adaptado de: IRENA, 2023)

Como se puede observar en el esquema, el agua que se toma para la refrigeración del sistema es de 53% del total extraído, con lo cual representa la mayor fuente de requerimiento de agua en la producción de hidrógeno verde. Naturalmente, esta relación es específica para el caso presentado (electrolizador alcalino, esquema de refrigeración semi-cerrada y fuente superficial o subterránea) y puede sufrir variaciones para otras alternativas tecnológicas. No obstante, pone de manifiesto el papel relevante del proceso de refrigeración en los requerimientos de agua totales para la producción de H_2 .

En suma, se observa según los datos disponibles en la bibliografía que se deben extraer de la fuente de agua, ya sea superficial o subterránea, entre 32-37 L/kgH₂ para producir 1 kg de hidrógeno verde con la tecnología de electrolisis alcalina y entre 27-29 L/kgH₂ para producir 1 kg de hidrogeno verde con la tecnología de electrolisis PEM. Conviene destacar, que estos valores corresponden a refrigeración con agua y no contemplan el re-uso de agua en el proceso, por lo que, desde este punto de vista puede ser un escenario conservador.

3.4 Calidad de agua requerida en cada etapa del proceso de producción

El proceso de producción de hidrógeno verde requiere como uno de los principales insumos al agua. Sin embargo, es necesario definir qué tipo de agua se requiere en cada etapa del proceso. En este sentido, se pueden distinguir tres tipos de agua involucrados en el proceso de producción de hidrogeno verde:

- Agua ultrapura (materia prima que ingresa al electrolizador)
- Agua para refrigerado
- Agua bruta

La cantidad de agua bruta que se toma del curso es diferente que la cantidad de agua ultrapura que ingresa al electrolizador, así como la calidad del agua ultrapura es diferente al agua para refrigerado. A continuación, se describe por separado los requerimientos de calidad para cada tipo de agua.

3.4.1 Agua ultrapura

Se le denomina agua ultrapura al agua que es adecuada para el ingreso al proceso de electrólisis. El tratamiento del agua para el acondicionamiento previo al ingreso al electrolizador para la producción de hidrógeno consta de una etapa de pretratamiento, determinado por la calidad del agua bruta, seguido de una etapa de tratamiento de su calidad específicamente. Dependiendo de la tecnología del electrolizador, los pasos del tratamiento pueden variar, pero podrían abarcar desde la descalcificación hasta la deionización. El rol del pretratamiento es acondicionar el agua para el sistema de tratamiento, esto implica llevar al agua a una calidad similar a la de agua potable. Los tipos de pretratamiento varían en función

de la calidad y fuente del agua bruta. Una vez que el agua bruta ha sido pretratada, se deben abordar los siguientes problemas para convertirla en agua de calidad ultrapura: Contenido de iones – conductividad, dureza, Carbono Orgánico Total, Sílice y gases. Para esta etapa se utilizan procesos como la osmosis inversa, ablandadores, desgasificación, filtros de lecho mixto o unidades de electro deionización (EDI) (EUROWATER, 2022).

En la Figura 3 se resume tanto el proceso de pretratamiento según la fuente de agua como el proceso de tratamiento, tomado de EUROWATER, 2022.

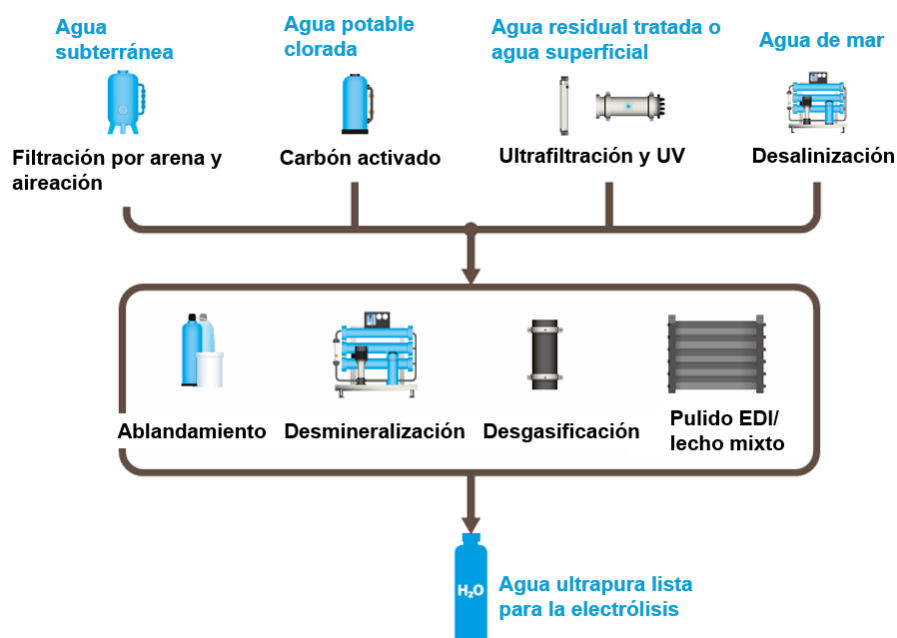


Figura 3: Resumen del proceso de tratamiento del agua desde el agua bruta hasta el agua ultrapura adecuada para la electrólisis. (Fuente: EUROWATER,2022)

Distintos parámetros influyen la calidad del agua para que sea adecuada para la electrólisis. Entre ellos, se incluye la tecnología del electrolizador, el material del electrodo, el diseño del sistema, entre otros. A su vez, cada ion y molécula en el agua afectan el electrolizador de manera diferente. Algunos generan corrosión o aumentan la necesidad de limpieza, otros disminuyen la eficiencia del electrolizador o inclusive generan daños importantes al mismo. La mejora de la pureza del agua puede reducir la resistencia eléctrica de la misma y por ende aumentar la eficiencia energética. En vista de las distintas variables y efectos, es difícil establecer un estándar único de calidad de agua aplicable a todos los electrolizadores.

Las características que debe tener el agua de alta pureza para ingresar al electrolizador son principalmente: baja conductividad, mínimo carbono orgánico y baja concentración de sólidos disueltos. Particularmente, se toma como referencia la norma ASTM D1193 la cual establece límites a distintos parámetros para agua utilizada como reactivo. En el caso del agua para

electrólisis se toma como referencia los parámetros asociados a la calidad de agua Tipo I y II, los cuales se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Parámetros de calidad de agua Tipo I y Tipo II. (Fuente: Norma ASTM D1193-06 (2018)).

Parámetro	Unidad	Tipo I	Tipo II
Conductividad eléctrica	$\mu\text{S/cm}$ a 25 °C	0,0555	1
Resistividad eléctrica	$\text{M}\Omega\text{-cm}$ a 25 °C	18	1
Carbono orgánico total (TOC)	$\mu\text{g/L}$	50	50
Sodio (Na)	$\mu\text{g/L}$	1	5
Cloro (Cl)	$\mu\text{g/L}$	1	5
Sílice	$\mu\text{g/L}$	3	3

Las principales tecnologías mediante las cuales se alcanza la calidad necesaria para el ingreso al electrolizador son: ósmosis inversa e intercambio iónico.

3.4.2 Agua para refrigeración

Debido a que se utiliza un sistema de refrigeración en circuito cerrado, solo se debe reponer el agua evaporada y la purga.

El agua para enfriado y el agua para la electrólisis tienen requerimientos de calidad muy distintos. Es necesario un tratamiento adecuado del agua para refrigeración con el fin de evitar los siguientes problemas comunes: corrosión, crecimiento microbiológico, formación de sedimentos e incrustaciones. Cualquiera de estos problemas puede reducir significativamente la eficiencia de la refrigeración y aumentar el riesgo de tiempo de inactividad del sistema.

El agua para refrigeración del sistema debe ser agua limpia y libre de bacterias (menos de 100 UFC/ml), por ejemplo, agua desmineralizada, agua de ósmosis inversa, agua desionizada o agua destilada. En cuanto a los parámetros químicos del agua de base a utilizar en la refrigeración, se toman en cuenta las siguientes recomendaciones realizadas por IBM (2021) (Tabla 4).

Tabla 4: Requisitos de calidad del agua para refrigeración (IBM, 2021).

Parámetro	Unidad	Valor ≤
Conductividad eléctrica	μS/cm a 25 °C	10
Metales	ppm	0,1
Magnesio	ppm	1
Manganeso	ppm	0,1
Fósforo	ppm	0,5
Silicio	ppm	1
Sodio	ppm	0,1
Bromuro	ppm	0,1
Nitrito	ppm	0,5
Cloruro	ppm	0,5
Nitrato	ppm	0,5
Sulfato	ppm	0,5
pH	-	6,5-8
Turbiedad	NTU	1

3.5 Proyección de consumo medio en Uruguay al horizonte 2040

Considerando un escenario de proyección para el año 2040 de producción anual de 1.000.000 de toneladas de H₂, se tendrán los siguientes volúmenes anuales de agua tomando la referencia de requerimientos de IRENA (2023), particularmente los valores medios presentados en la Tabla 2 tomados para agua superficial y subterránea.

- 28 a 34 millones de m³ de agua tomada de la fuente (toma para tratamiento, electrólisis y refrigeración).
- 9 millones de m³ de agua consumidas para la producción de hidrogeno verde (volumen que no retorna inmediatamente al ciclo hidrológico, el mismo retorna como parte de procesos posteriores, como son la combustión del hidrógeno y la síntesis de derivados, por ejemplo, metanol).

A modo de comparación de los requerimientos hídricos para la producción de H₂ con otros usos del agua, se presentan los consumos anuales de agua habilitados por DINAGUA.

- Consumo humano: 419 millones de m³
- Industrial: 610 millones de m³
- Riego: 3.257 millones de m³

- Otros usos: 138 millones de m³

Se puede observar que los requerimientos hídricos en términos medios anuales proyectados al horizonte 2040 para la producción de H₂ en Uruguay son de uno o dos órdenes menores que los consumos habilitados para otros usos en el país. Sin embargo, se debe tener en cuenta que estos requerimientos se expresan en términos medios y si bien resultan significativamente menores cuando se los compara con otros usos, se debe considerar escala temporal menor así como el impacto local en el sitio donde se extrae el agua.

4 CARACTERIZACIÓN GLOBAL DE LA OFERTA DEL RECURSO HÍDRICO SUPERFICIAL

En esta sección se presentan la información disponible, la metodología seguida y los principales resultados obtenidos en la caracterización global de la oferta del recurso hídrico superficial para Uruguay.

Para ello, por un lado, se debe cuantificar la disponibilidad/oferta de agua y, por el otro, se debe estimar la demanda actual del recurso hídrico (considerando los usos actuales autorizados por la DINAGUA) sin proyectos de hidrógeno verde (“escenario de línea de base”).

4.1 Información disponible

Para la caracterización de la disponibilidad de agua se dispuso de información de los escurrimientos mensuales (expresados en mm/mes) obtenidos a partir del modelo de balance hídrico actualizado al 2024 para el periodo 1980-2023 para las cuencas Nivel 3¹ (información proporcionada por la DINAGUA). En el caso del río Uruguay, se utilizaron datos de caudal (expresados en m³/s) reportados por la Comisión Técnica Mixta de Salto Grande (CTM). Esta serie corresponde a los caudales diarios erogados (vertidos y turbinados) en Salto Grande y está disponible en el periodo 1980-2020.

En cuanto a la demanda actual del recurso hídrico superficial, se dispuso de los volúmenes anuales (expresados en m³) otorgados o en estudio, discriminados por tipo de obra, uso y subcuenca Nivel 2 para el periodo 2010-2023 (información proporcionada por la DINAGUA). Para el caso del río Uruguay, para las demandas correspondientes a Argentina se cuenta con información proporcionada por la CARU pero se estima que no abarca la totalidad de las demandas del territorio argentino.

4.2 Metodología

La metodología seguida para la caracterización global de la oferta del recurso hídrico superficial comprende los siguientes pasos:

- 1) Análisis de la información sobre los escurrimientos mensuales en las cuencas Nivel 3 e intercambio con DINAGUA.

¹ Con fines de estudio, inventario y gestión de los recursos hídricos la DINAGUA ha establecido una división del territorio con base en las cuencas hidrográficas mediante un sistema de codificación de tres dígitos: el primer dígito identifica la cuenca principal (seis cuencas principales); el segundo dígito (de 0 a 9) permite identificar hasta diez subcuencas principales en cada cuenca y el tercer dígito (de 0 a 9) permite subdividir cada subcuenca en hasta diez unidades del curso principal o de cursos afluentes. Por extensión del procedimiento, el sistema de codificación puede desarrollarse todo lo que sea necesario hacia subdivisiones de cuencas de menor extensión. (Fuente: Sección 5.2.1 del Plan Nacional de Aguas, 2017).

- 2) Cálculo mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG) de los escurrimientos ponderados por el área en las cuencas Nivel 2 (donde se tiene la información sobre los volúmenes otorgados) a partir de los escurrimientos en las cuencas Nivel 3 (ver Figura 4).
- 3) Análisis de la información sobre los volúmenes otorgados e intercambio con DINAGUA.
- 4) Acumulación de los volúmenes otorgados por año y cuenca Nivel 2 (asumiendo algunas hipótesis que se detallarán).
- 5) Determinación del grado de regulación/estrés hídrico actual para cada una de las cuencas Nivel 2 mediante el cálculo del cociente entre el volumen otorgado y la oferta de agua.
- 6) Análisis anual (acumulados anuales) y para el periodo de estiaje (acumulados en el cuatrimestre Dic-Mar).
- 7) Construcción de los mapas de estrés hídrico.



Figura 4: División de Uruguay en subcuencas Nivel 2 y 3.

A continuación, se detallan algunos aspectos e hipótesis consideradas en cada paso.

1) Análisis de la información sobre los escurrimientos mensuales

Los escurrimientos mensuales para las cuencas Nivel 3 proporcionados por DINAGUA surgen de un modelo de balance hídrico de paso mensual, no son datos medidos.

En el análisis exploratorio de dichas series se identificaron algunos valores “sospechosos” (valores muy bajos concentrados en algunas cuencas y periodos) que, luego de un intercambio con la DINAGUA, fueron revisados y corregidos.

3) Análisis de la información sobre los volúmenes otorgados

En el análisis exploratorio de los volúmenes anuales otorgados según tipo de obra, uso y subcuenca Nivel 2 para el periodo 2010-2023 se identificaron algunos valores a revisar, lo cual dio lugar a un intercambio con la DINAGUA mediante el cual se evacuaron todas las consultas existentes.

Cabe destacar que las altas y bajas de las obras refieren a las fechas de las instancias administrativas: fecha de ingreso de la solicitud (en la base de datos) hasta la fecha de vencimiento. Por lo que puede que respondan más a la “dinámica administrativa” que a la evolución real de la demanda.

4) Acumulación de los volúmenes otorgados

Para la acumulación de los volúmenes anuales se adoptaron las siguientes hipótesis:

- Para todas las cuencas Nivel 2 se excluyeron las obras que toman de “fuentes infinitas” (CLASE = 0 en la codificación de la DINAGUA). A los efectos prácticos de este análisis, por “fuentes infinitas” se refiere a las obras que toman agua del Río Uruguay, Río de la Plata, Laguna Merín y Océano Atlántico, y que por lo tanto hay que “descontar” de las cuencas interiores.
- Para el análisis del Río Uruguay se consideraron las obras “CLASE = 0” pertenecientes a las cuencas Nivel 2 que aportan a dicho curso (subcuencas 10 a 19).
- Se excluyeron las obras con usos no consuntivos.
- El volumen otorgado a la toma de Aguas Corrientes (subcuenca 64) se distribuyó en las subcuencas aguas arriba (subcuencas 60 a 63) en forma proporcional a los escurrimientos medios anuales. Los volúmenes resultantes fueron sumados a cada una de dichas subcuencas.

5) Cálculo del grado de estrés hídrico

Para el cálculo del grado de estrés hídrico se consideraron dos casos de oferta del recurso hídrico:

- *Oferta media*: mediana de los escurrimientos en cada subcuenca Nivel 2 en el periodo 1980-2023.
- *Oferta mínima*: percentil 5 de los escurrimientos en cada subcuenca Nivel 2 en el periodo 1980-2023. A su vez, se presentan en el Anexo I los resultados obtenidos considerando el mínimo histórico en cada subcuenca.

Se consideró una *demanda máxima* obtenida como el máximo de los volúmenes otorgados en cada subcuenca Nivel 2 en los últimos cinco años disponibles (2019-2023).

6) Análisis para el periodo de estiaje (Dic-Mar)

Para distribuir los volúmenes otorgados (anuales) en el periodo Dic-Mar se consideraron las siguientes hipótesis según el tipo y uso del aprovechamiento:

Tomas directas:

- Riego: Se consideró que la totalidad del volumen otorgado se emplea entre Dic y Mar.
- Otros usos: se consideró una distribución uniforme en el año, lo que implica un tercio del volumen anual otorgado para el cuatrimestre bajo consideración.

Embalses/Tajamares/Tanques:

- Se consideró un volumen otorgado proporcional al escurrimiento en el cuatrimestre Dic-Mar.

Construcción de los mapas en GIS

Se construyeron dos mapas de estrés hídrico para el caso anual y Dic-Mar respectivamente:

- Demanda Máxima / Oferta Media
- Demanda Máxima / Oferta Mínima

Para la escala de colores se empleó la clasificación propuesta por IRENA (2023): < 10% estrés bajo, 10-20% estrés bajo a medio, 20-40% estrés medio a alto, 40-80% estrés alto, > 80% estrés muy alto.

4.3 Resultados

En primer lugar, en las siguientes figuras se presentan los mapas del escurrimiento mensual (expresado en Hm^3/mes) en las cuencas Nivel 2 para la oferta media (panel izquierdo) y mínima (panel derecho) para todo el año y el cuatrimestre Dic-Mar respectivamente.

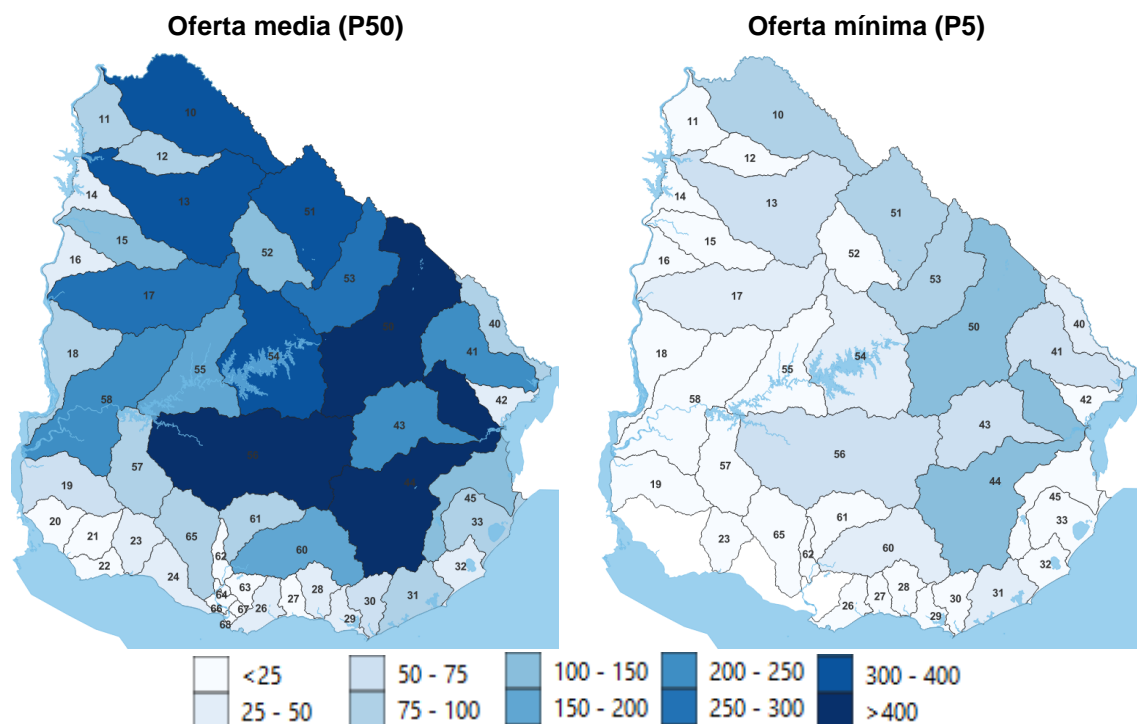


Figura 5: Esgurrimiento mensual (Hm³/mes) para la oferta media y mínima para todo el año.

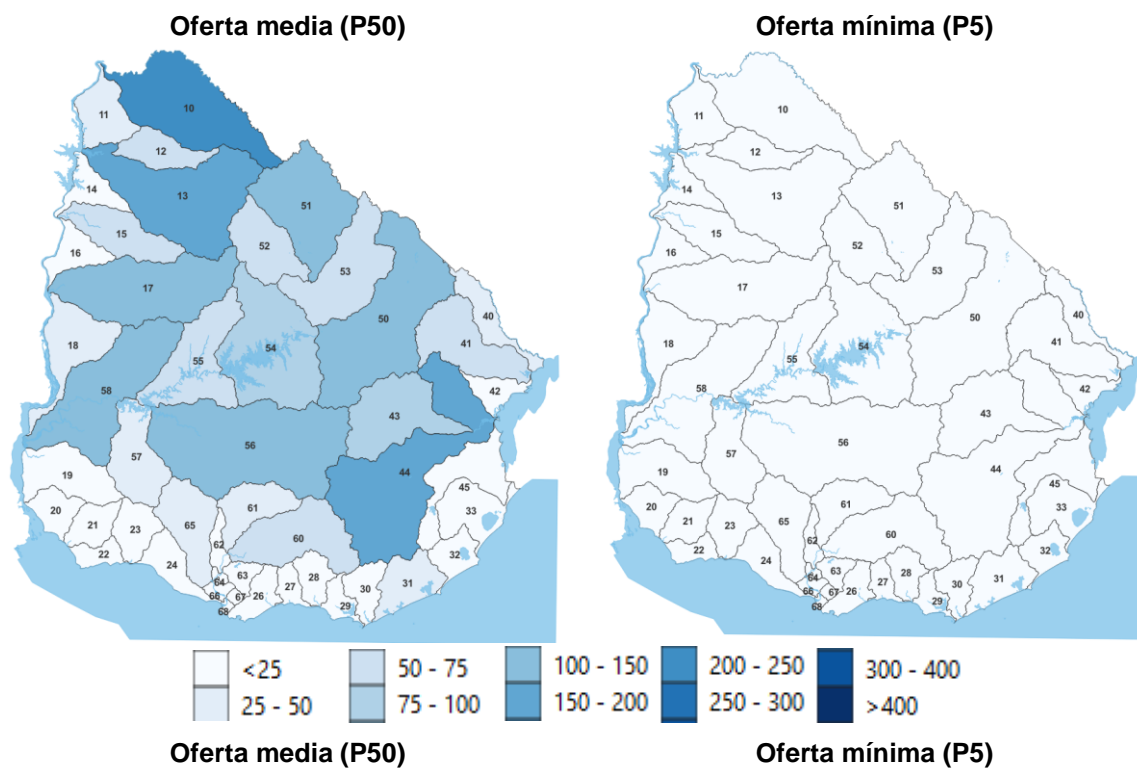


Figura 6: Esgurrimiento mensual (Hm³/mes) para la oferta media y mínima para Dic-Mar.

En la Figura 7 se presentan los mapas de estrés hídrico obtenidos a partir de la demanda máxima y la oferta media (panel izquierdo) y mínima (panel derecho) para todo el año, en base a los datos con los que se contó para el presente estudio. Los resultados obtenidos para el Río Uruguay se representan con un rectángulo (RU). En negrita se presenta el código de cada subcuenca Nivel 2.

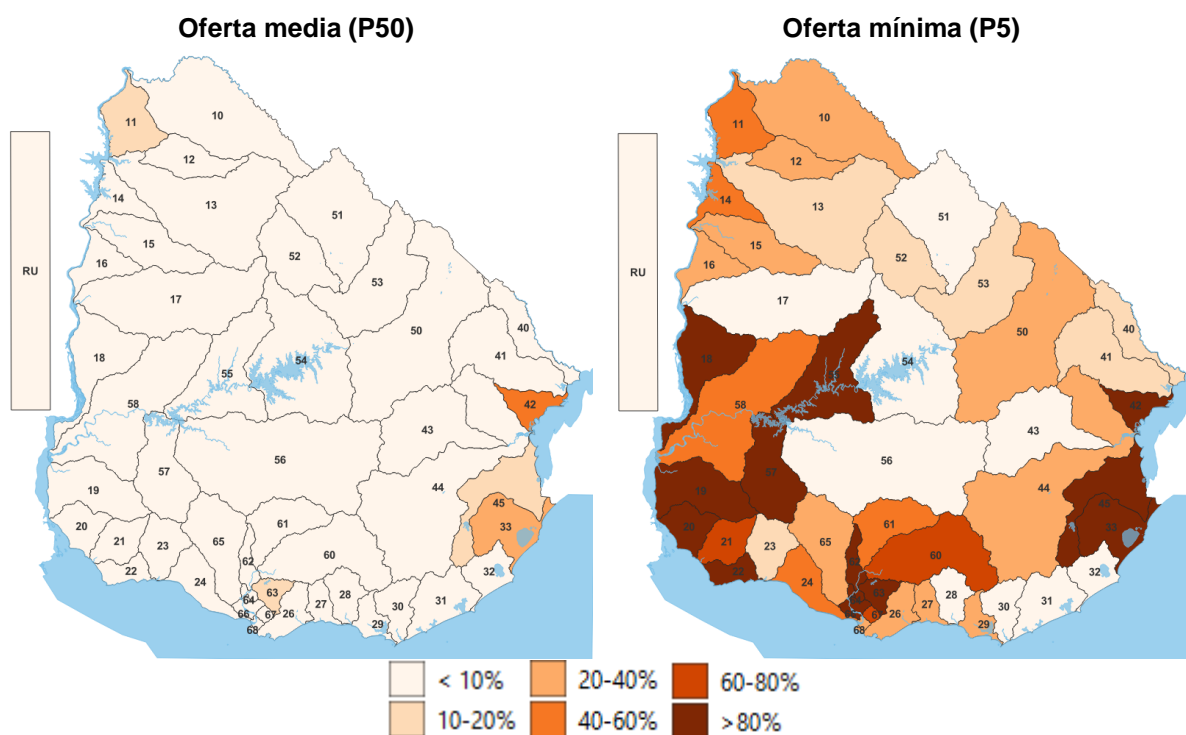


Figura 7: Mapas de estrés hídrico obtenidos a partir de la demanda máxima y la oferta media (izquierda) y mínima (derecha) para todo el año.

Análogamente, en la Figura 8 se presentan los resultados obtenidos para el cuatrimestre Dic-Mar.

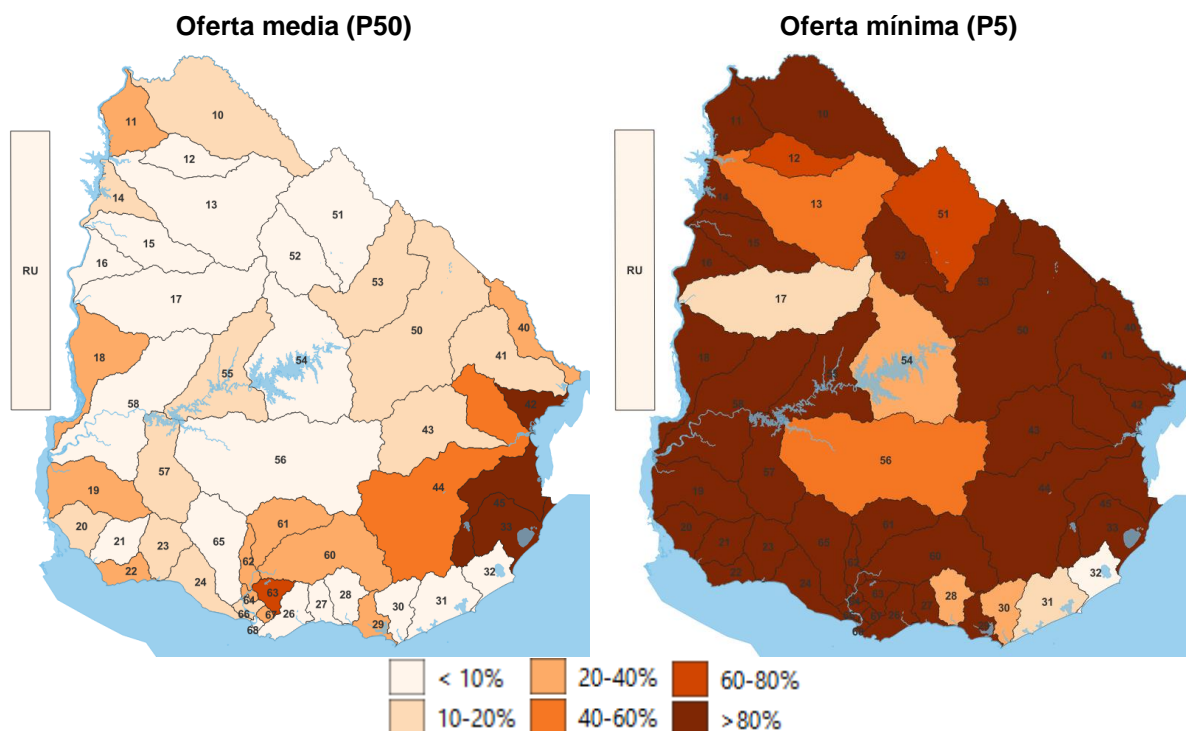


Figura 8: Mapas de estrés hídrico obtenidos a partir de la demanda máxima y la oferta media (izquierda) y mínima (derecha) para el cuatrimestre Dic-Mar.

A escala de subcuenca Nivel 2, los mapas de estrés hídrico para la demanda máxima actual muestran la relevancia de considerar la variabilidad temporal y espacial de la oferta de agua. Existen varias cuencas superficiales que sufren escasez hídrica con las demandas y variabilidad climática actual y no soportan más presión sobre el recurso (sobre todo en estiaje). En particular, puede verse que considerando la oferta mínima (P5 en verano) y la demanda máxima de los últimos años en cada cuenca, la mayor parte de las cuencas de Uruguay muestran un estrés superior al 80%.

5 COMPARACIÓN ENTRE OFERTA Y DEMANDA PARA ESCENARIOS DE H2V

En esta sección se presentan los resultados obtenidos acerca de las comparaciones globales entre la oferta y la demanda del recurso hídrico superficial para dos escenarios de demanda de H2V:

- **Proyecto de escala mediana:** toma de agua de aproximadamente 1000 m³/d.
- **Proyecto de escala grande:** toma de agua de aproximadamente 7000 m³/d.

La metodología para la construcción de los mapas de estrés hídrico es análoga a la presentada en la sección 4.2, agregando en cada subcuenca Nivel 2 la demanda del proyecto de H2V según corresponda (es decir, se adiciona a la demanda actual 7000 o 1000 m³/día dependiendo si se considera un proyecto H2V grande o mediano respectivamente). En el caso del Río Uruguay, considerando que la oferta de agua es notoriamente mayor en esta cuenca, se adoptó una demanda equivalente a 10 proyectos de H2V según la escala que corresponda.

Se incluye también la construcción de mapas del “ratio de demandas”, obtenido como el cociente entre la demanda de H2V (para cada tipo de proyecto) y la demanda actual del recurso hídrico en cada subcuenca Nivel 2 (demanda máxima en los últimos cinco años disponibles).

En la Figura 9 se presentan los mapas de “ratios de demanda” para un proyecto de H2V de escala mediana (izquierda) y grande (derecha) para todo el año.

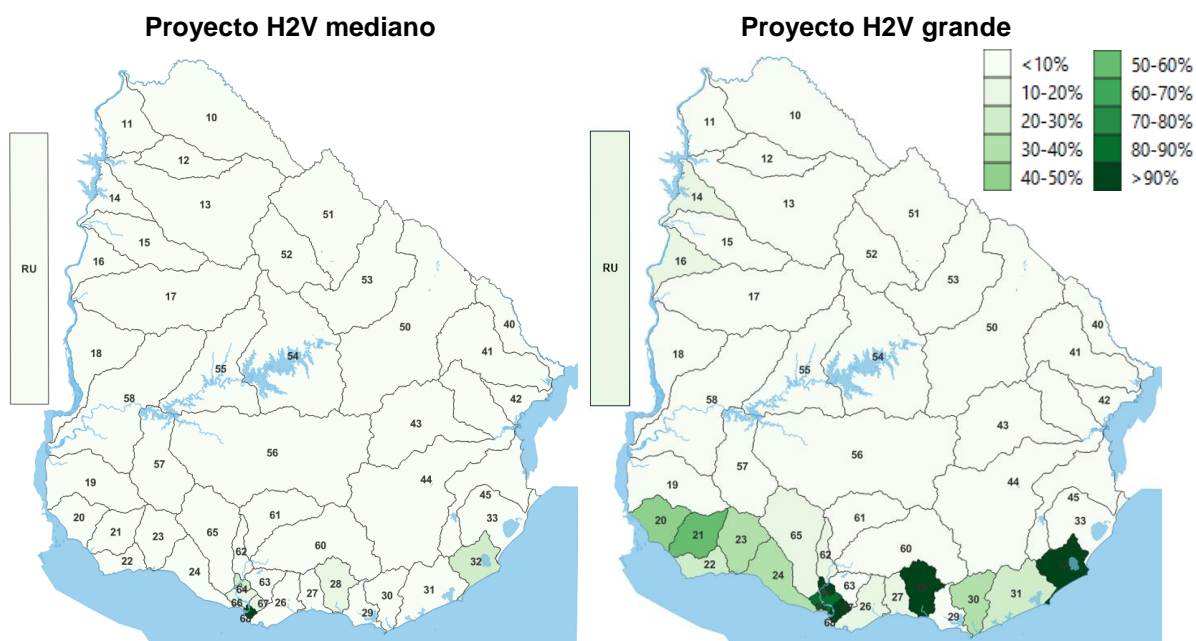


Figura 9: Mapas de “ratios de demanda” para un proyecto de H2V de escala mediana (izquierda) y grande (derecha) para todo el año.

Las demandas máximas existentes han sido autorizadas a partir de una lógica de disponibilidad del recurso hídrico. Esta disponibilidad, está íntimamente relacionada con la oferta de agua de la cuenca, asociada principalmente a la superficie de la misma. El ratio calculado en la Figura 9 implica el mismo valor de demanda para proyectos de hidrógeno ($1000 \text{ m}^3/\text{d}$ o $7000 \text{ m}^3/\text{d}$) para todas las cuencas, sin valorar la factibilidad del cumplimiento de esa demanda debido a que su superficie sea tan pequeña como para tener una oferta insuficiente de agua para dicha demanda. En consecuencia es esperable que, en cuencas de superficies pequeñas, el ratio de demanda de H2V sea mayor que en las de superficie media y grande.

En general, el ratio de H2V respecto a las demandas máximas actuales es inferior al 10% tanto para proyectos grandes como medianos de H2V, salvo para algunas cuencas costeras de superficie pequeña.

En la Figura 10 se presenta la comparación de los mapas de estrés hídrico obtenidos a partir del cociente entre la demanda máxima y la oferta media (paneles izquierdos) y mínima (paneles derechos) para todo el año: (i) en la situación actual (fila superior), (ii) agregando un proyecto de H2V de escala mediana a la demanda actual (fila intermedia), (iii) agregando un proyecto de H2V de escala grande a la demanda actual (fila inferior).

Análogamente, en la Figura 11 se presentan los resultados obtenidos para el cuatrimestre Dic-Mar.

De ambas figuras se desprende que, al considerar sobre la demanda máxima actual, un proyecto de H2V (grande o mediano) el impacto en el estrés hídrico no cambia significativamente en relación a la situación actual.

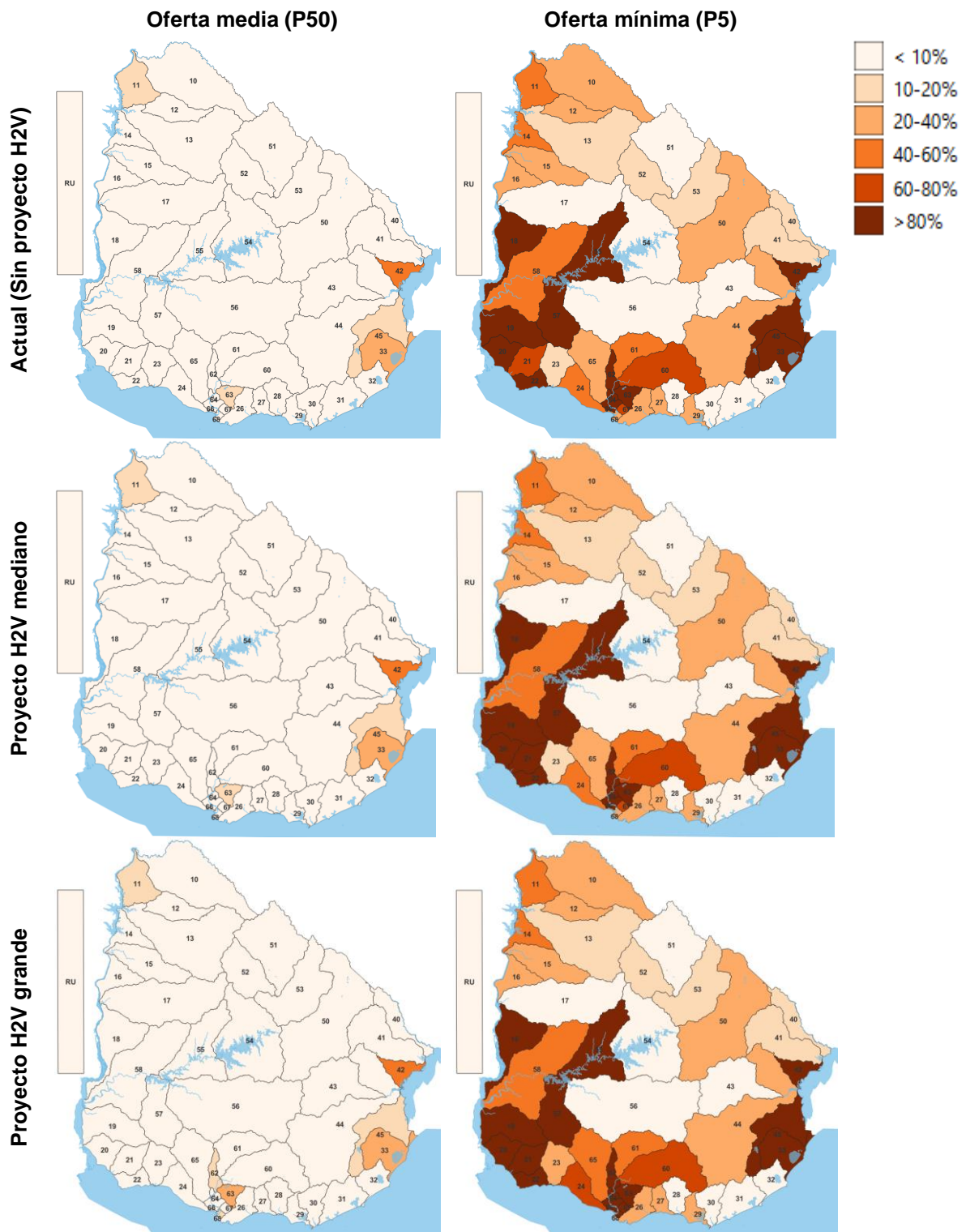


Figura 10: Comparación de los mapas de estrés hídrico para todo el año en la situación actual y agregando un proyecto de H2V de escala mediana/grande a la demanda actual.

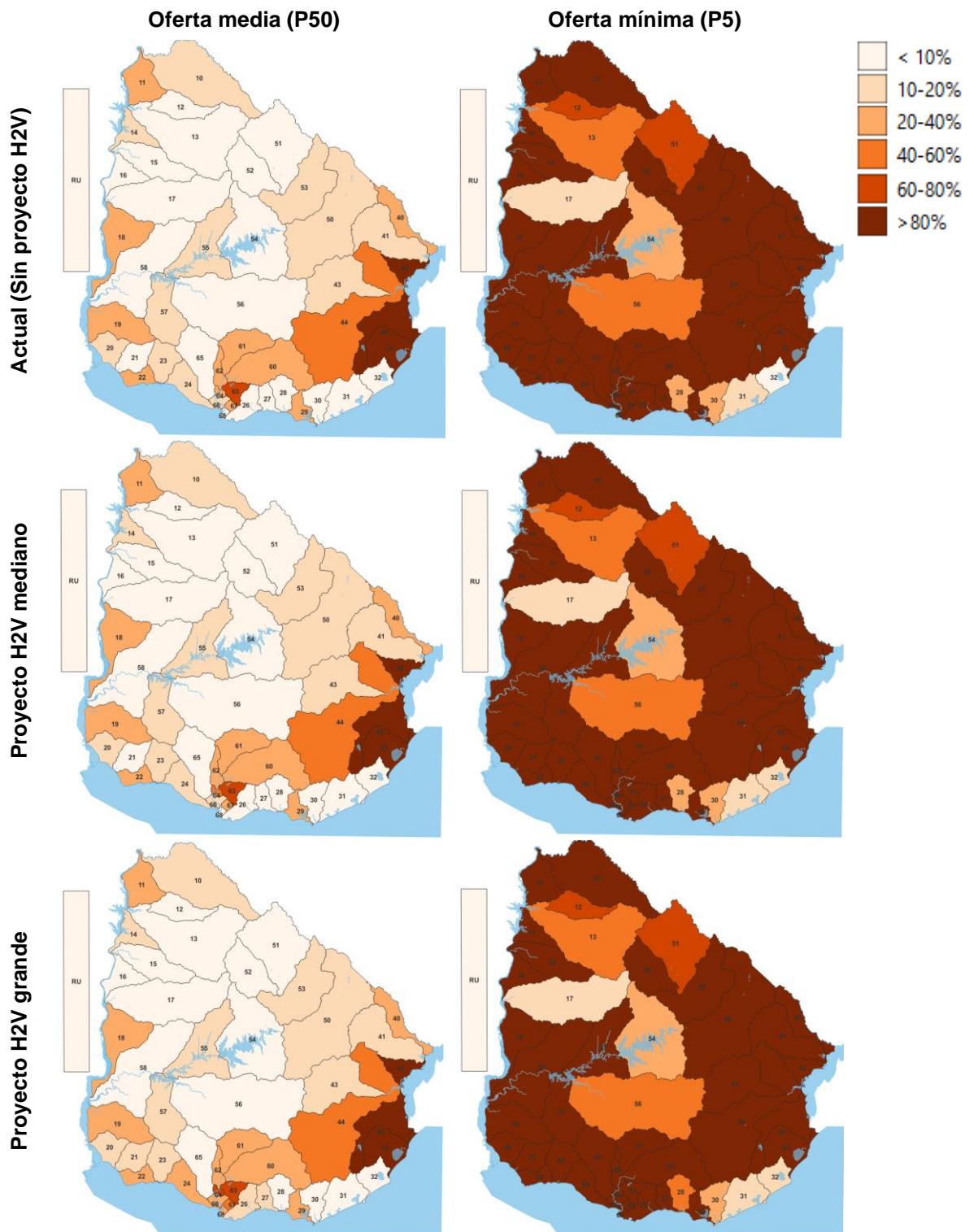


Figura 11: Comparación de los mapas de estrés hídrico para el cuatrimestre Dic-Mar en la situación actual y agregando un proyecto de H2V de escala mediana/grande.

6 CARACTERIZACIÓN ESPECÍFICA DEL RECURSO HÍDRICO SUPERFICIAL

En esta sección se presentan la información disponible, la metodología seguida y los principales resultados obtenidos en la caracterización específica de la oferta del recurso hídrico superficial y su potencial uso para la producción de H2 y derivados en Uruguay.

Para ello se contempló, por un lado, la variabilidad espacial y temporal de la oferta hídrica a nivel de las cuencas monitoreadas por la DINAGUA² y, por otro, las características específicas de la demanda del recurso para la producción de H2 y derivados.

Se destaca que, a diferencia de la caracterización global presentada en el capítulo 4, en la caracterización específica se emplean datos de caudal medidos (en lugar de modelados) y de paso diario (en lugar de escurrimientos mensuales), que permiten aplicar un abordaje más detallado para la identificación y caracterización de los periodos de falla o déficit hídrico frente a una nueva demanda a satisfacer.

6.1 Información disponible

6.1.1 Disponibilidad de agua

Para la caracterización de la disponibilidad de agua se dispuso de información de los caudales diarios (expresados en m³/s) registrados en nueve estaciones hidrométricas seleccionadas (información proporcionada por la DINAGUA). Dichas cuencas fueron seleccionadas uniformemente distribuidas a lo largo de todo el país, de forma de contemplar las variaciones espaciales en la precipitación, en la evapotranspiración potencial y en los suelos, además de tener distinta área de cuenca como se presenta en la Tabla 5.

Adicionalmente se dispuso de los caudales diarios erogados (vertido y turbinado) por la central hidroeléctrica de Palmar localizada sobre el río Negro (información brindada por UTE).

En la Figura 12 se presenta la distribución espacial de las cuencas seleccionadas sobre el mapa de estrés hídrico obtenido a partir de la demanda máxima y la oferta media para el cuatrimestre Dic-Mar agregando un proyecto de H2V de escala grande a la demanda actual.

² El catálogo de estaciones hidrométricas y su distribución espacial se encuentran publicados en https://www.ambiente.gub.uy/informacion_hidrica/datos_abiertos.php.

Tabla 5: Estaciones hidrométricas de la DINAGUA seleccionadas para la caracterización específica del recurso hídrico superficial.

Estación	Curso de agua	Cuenca de aporte (km ²)	Caudal específico promedio (L/s/km ²)
141	Río Queguay	7863	14.1
171	Río Arapey	6932	15.3
52	Río Tacuarembó	6600	19.8
10.1	Río Olimar	4676	19.8
140	Río Dayman	3200	25.6
14	Río Cebollatí	2900	14.7
96	Río Tacuarí	1425	17.3
135	Río San Juan	747	8.7
122	Tacuarembó Chico	648	21.1

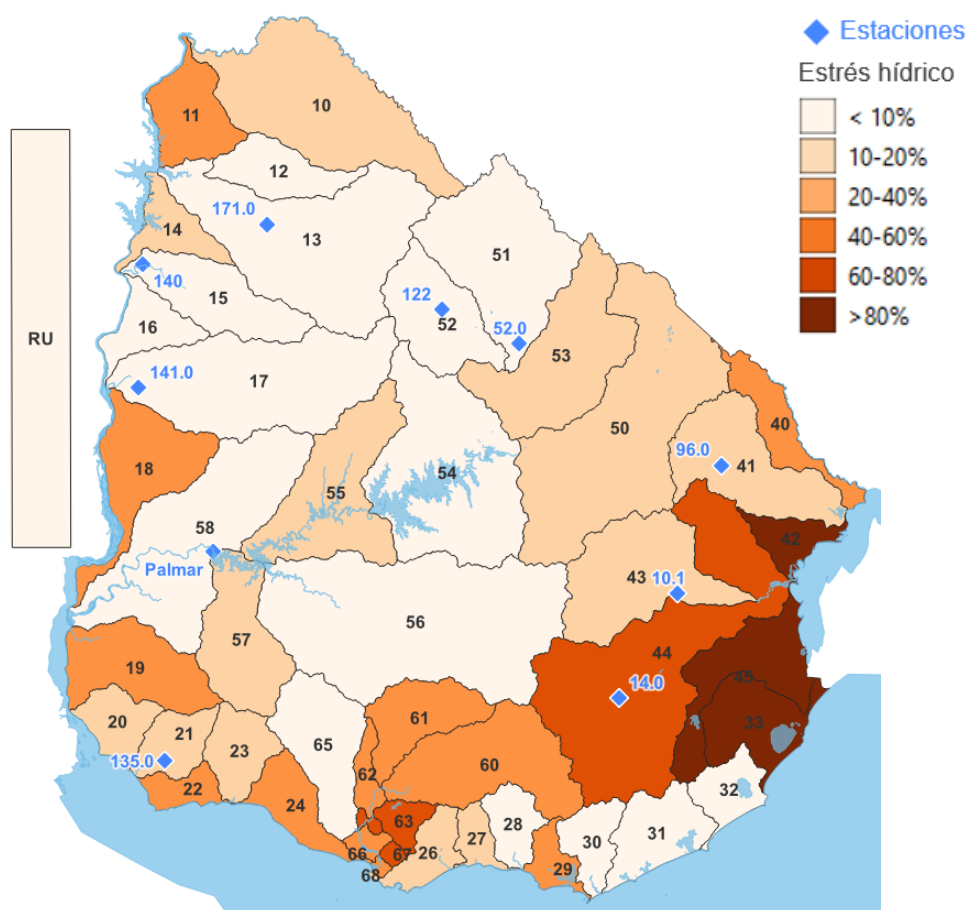


Figura 12: Distribución espacial de las estaciones seleccionadas (rombo celeste) sobre el mapa de estrés hídrico obtenido a partir de la demanda máxima y la oferta media para el cuatrimestre Dic-Mar agregando un proyecto de H2V de escala grande a la demanda actual.

El periodo de registro es variable según la estación entre 1954 y 2024. Para el análisis se consideró el periodo en común comprendido entre 1994 y 2023 (30 años de datos).

En el Anexo I se presenta un análisis exploratorio de la calidad de los datos disponibles para cada estación seleccionada.

6.1.2 Demanda actual del recurso hídrico

En cuanto a la demanda actual del recurso hídrico superficial, se dispuso de los volúmenes anuales (expresados en m³) otorgados o en estudio, discriminados por tipo de obra, uso y subcuenca Nivel 2 para el periodo 2010-2023 (información proporcionada por la DINAGUA).

Cabe destacar que las altas y bajas de las obras refieren a las fechas de las instancias administrativas: fecha de ingreso de la solicitud (en la base de datos) hasta la fecha de vencimiento. Por lo que puede que la variabilidad temporal responda más a la “dinámica administrativa” que a la evolución real de la demanda.

Dado que la localización de las estaciones hidrométricas seleccionadas no coincide con los puntos de cierre de las subcuencas Nivel 2 (ver Figura 12), la demanda actual se estimó, en cada caso, corrigiendo los volúmenes según el área de aporte “efectiva” a cada estación.

El criterio actual que aplica la Administración para el otorgamiento de nuevos aprovechamientos de tomas directas es autorizar hasta un caudal máximo (acumulado entre todas las tomas) igual al caudal con 80% de probabilidad de excedencia (q80). A modo de diagnóstico de la situación actual, para cada una de las cuencas seleccionadas, se comparó el caudal autorizado para tomas con el q80 obtenido a partir de los caudales medidos. En ese sentido, si bien no se consideraron los datos detallados sobre la localización de cada toma autorizada, para las cuencas seleccionadas se distinguen tres situaciones de “saturación”:

- Las cuencas de los ríos Olimar (10.1), Cebollatí (14), Tacuarembó (52) y Tacuarí (96) parecen estar cerca de la saturación y puede ser una limitante severa a la asignación de nuevas autorizaciones.
- En las cuencas de los ríos Tacuarembó Chico (122) y San Juan (135) las tomas ya autorizadas median el criterio límite del q80 y puede ser una limitante a la asignación de nuevas autorizaciones en algunos tramos.
- Para el resto de las cuencas, el criterio de limitar la asignación de tomas superficial al q80 parece no ofrecer restricciones importantes a la asignación de nuevas autorizaciones con los caudales considerados.

Se hace notar que el criterio de “saturación” respecto a la adjudicación de permisos de toma según la normativa actual no es directamente comparable con el de estrés hídrico, por más que están relacionados. En particular, su relación es más directa con el mapa de estrés entre

la demanda actual y la oferta del percentil 20 del caudal (80% de excedencia), P20, que es más exigente que el de la oferta media (P50) y menos exigente que el de la oferta mínima (P5) anteriormente presentados.

6.2 Metodología

La metodología seguida para la caracterización específica de la oferta del recurso hídrico superficial comprende los siguientes pasos:

- Análisis de calidad de las series temporales de caudales diarios.
- (Des)-Naturalización de las series de caudales (evaluación de la necesidad de ajustar las series de caudales registrados, de manera de que sean representativos de la oferta de agua disponible para nuevos usos).
- Definición de indicadores de la “falla” (oferta versus demanda).
- Análisis de sensibilidad a demandas adicionales (ambiental, H2V, otras).

A continuación, se detallan algunos aspectos e hipótesis consideradas en cada paso.

6.2.1 (Des)-Naturalización de las series de caudales

Dado que los caudales medidos están “afectados” por los usos existentes en la cuenca de aporte, y considerando que los usos autorizados han ido variando a lo largo del tiempo, surge la pregunta sobre cuál es la oferta de agua disponible para nuevos usos.

A continuación se analiza la evolución de los usos autorizados en el periodo de estudio, con el propósito de evaluar la necesidad de ajustar las series de caudales registrados en cada cuenca, de manera de que sean representativos de la oferta de agua disponible para nuevos usos.

En este sentido, se adoptaron las siguientes hipótesis para distribuir a lo largo del año los volúmenes autorizados (expresados en $\text{Hm}^3/\text{año}$) según el tipo de aprovechamiento y el uso, para luego analizar su evolución/tendencia en el periodo de estudio.

Tomas directas:

- Riego: Se consideró que la totalidad del volumen otorgado se emplea entre diciembre y marzo y se distribuye uniformemente.
- Otros usos: Se consideró una distribución uniforme a lo largo de todo el año.

Embalses/Tajamares/Tanques:

- Se consideró que el escurrimiento interceptado por los embalses es proporcional al área de las cuencas interceptadas.

- Para ello, a partir del listado de aprovechamientos registrados en la DINAGUA al 2019³, se estimó una relación media de $A_{\text{CUENCA}}/V_{\text{EMBALSE}}$ de $4,91 \text{ m}^{-1}$.

En la Figura 13 se presenta la evolución del caudal autorizado para tomas en el periodo 2010 a 2023 en la cuenca Nivel 2 correspondiente a cada estación hidrométrica analizada (resultado obtenido para el periodo de estiaje).

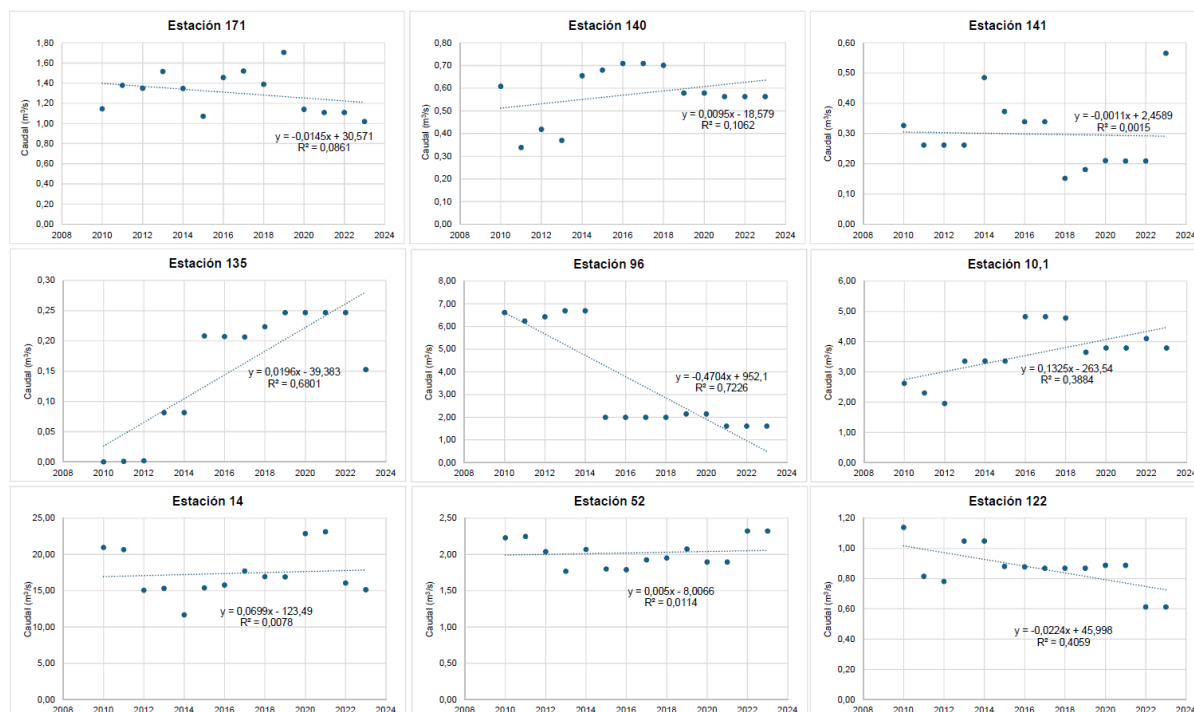


Figura 13: Evolución del caudal autorizado (m^3/s) para tomas en el periodo 2010 a 2023 en la cuenca Nivel 2 correspondiente a cada estación hidrométrica analizada (resultado obtenido para el periodo de estiaje).

Análogamente, en la Figura 14 se presenta la evolución del volumen autorizado para embalses en el periodo 2010 a 2023 en la cuenca Nivel 2 correspondiente a cada estación analizada.

³ Disponible en: <https://catalogodatos.gub.uy/dataset/ambiente-dinagua-aprovechamientos-de-los-recursos-hidricos-vigentes-2019>.

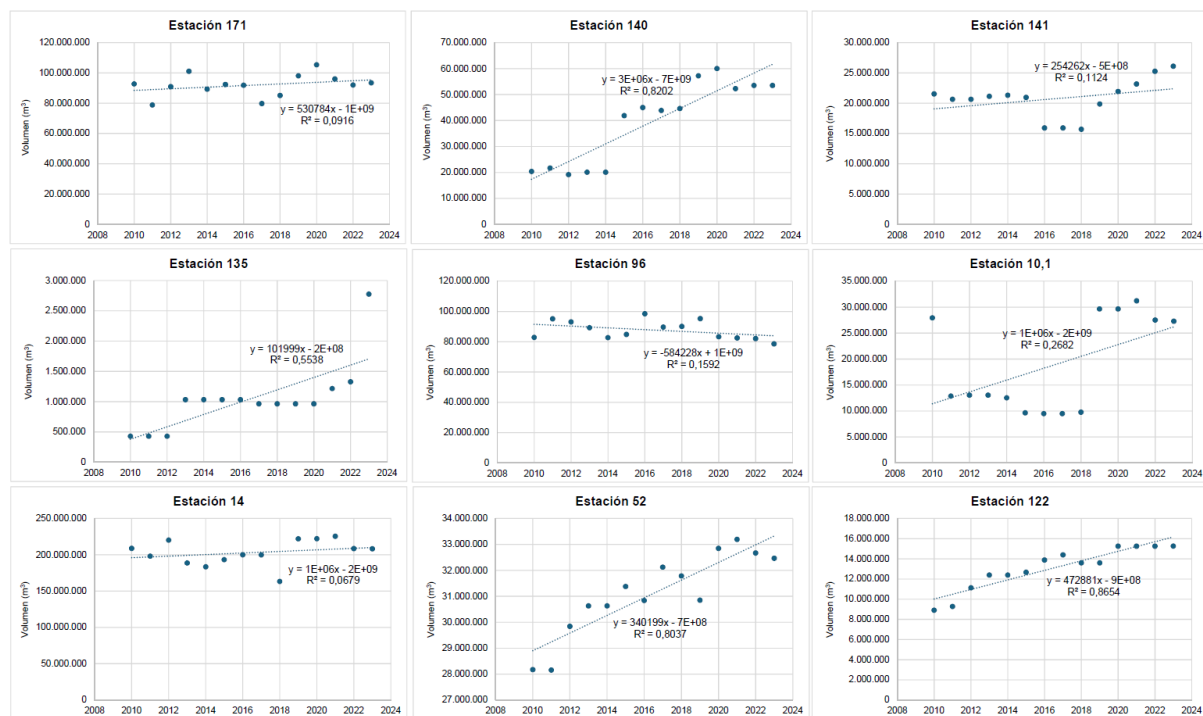


Figura 14: Evolución del volumen autorizado (m³) para embalses en el periodo 2010 a 2023 en la cuenca Nivel 2 correspondiente a cada estación hidrométrica analizada.

De los resultados obtenidos se desprende que:

- En el caso de las tomas, las oscilaciones interanuales de “origen administrativo” son mayores que las tendencias. Se observa una tendencia lineal negativa en cuatro de las nueve estaciones analizadas.
- En el caso de los embalses, si se considera que el escurrimiento interceptado es proporcional al área de las cuencas interceptadas, se obtiene una reducción del caudal medido de hasta un 6% (valor que surge de restar la diferencia entre el área interceptada máxima y mínima en el periodo disponible dividido el área de la cuenca de aporte).

Por lo tanto, restringiendo el análisis a los últimos 30 años, se adopta la serie de caudales medidos (sin ajustes) como la oferta de agua disponible para nuevos usos.

6.2.2 Definición de indicadores de la “falla”

Dada una localización geográfica donde se dispone de una cierta oferta de agua (representada por la serie temporal de caudales diarios medidos), frente a una nueva demanda a satisfacer (Q_R), interesa identificar y cuantificar los periodos en los cuales el caudal

disponible se encuentra por debajo de la misma (“periodos de falla o déficit hídrico”). Para ello, suele emplearse el “*Método del nivel umbral*” (“*Threshold level method*”: Yevjevich, 1967; Tallaksen et al., 1997; Smakhtin, 2001; Ouarda et al., 2008), el cual busca caracterizar simultáneamente los periodos de déficit hídrico en términos de duración (D), magnitud (I) y volumen (V) de la falla (Figura 15).

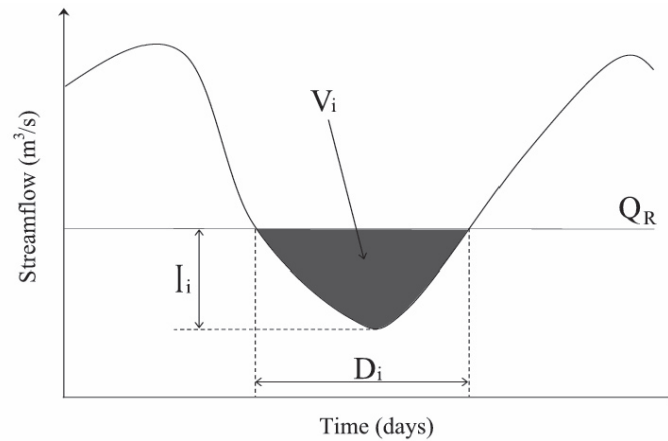


Figura 15: Caracterización de un evento de falla o déficit hídrico (Fuente: Ouarda et al., 2008).

En la Figura 16 se presenta un ejemplo de la aplicación del “Método del nivel umbral”: la serie azul corresponde a la serie temporal de caudales diarios, la línea roja representa el umbral/demanda adicional a evaluar y los triángulos indican el inicio (rojo) y fin (naranja) de cada evento o periodo de falla (conjunto de días consecutivos en los que el caudal se mantiene por debajo del umbral).

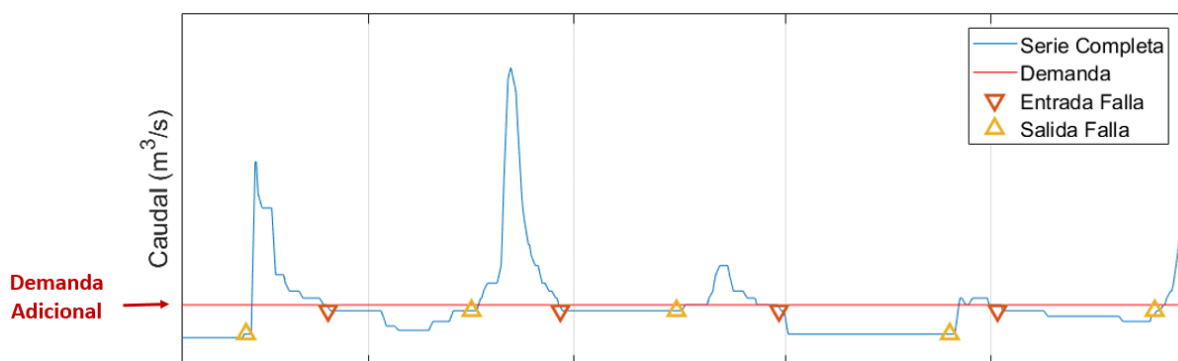


Figura 16: Ejemplo de la aplicación del “Método del nivel umbral” para una demanda adicional a satisfacer.

En particular, en este estudio se consideraron los siguientes indicadores de falla y se analiza su evolución en función de un umbral genérico que representa la demanda adicional:

- Frecuencia global: porcentaje de días de falla.
- Volumen acumulado de la falla mayor (Hm^3).

Adicionalmente, se analizó la distribución de los volúmenes de las fallas para ciertos umbrales específicos de interés: (i) demanda ambiental y (ii) demanda ambiental más la demanda de un proyecto de H2V de escala grande ($0,081 \text{ m}^3/\text{s}$). Los resultados se presentan con los volúmenes expresados en Hm^3 y normalizados según el caudal ambiental, con lo cual quedan expresados en unidades de tiempo (días) y se pueden interpretar como la duración de una falla equivalente de profundidad igual al caudal ambiental.

6.2.3 Análisis de sensibilidad a demandas adicionales

La elección del valor del caudal umbral está determinada por el objetivo del estudio y/o el tipo de régimen hidrológico. En este caso, para cada estación seleccionada, se realizó un análisis de sensibilidad a las siguientes demandas adicionales:

- Demanda de un proyecto de H2V de escala grande: $0,081 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Demanda ambiental (en el Anexo II se presenta la estimación de los caudales ambientales según el Decreto 368/018).

Para ello, se construyeron gráficos con el valor de los indicadores definidos anteriormente en función del valor del umbral genérico que representa la demanda adicional.

Se recuerda que para las tomas directas el actual criterio de la DINAGUA para el otorgamiento de nuevos aprovechamientos no permite superar al q_{80} considerando el acumulado entre todas las tomas.

6.3 Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada una de las cuencas analizadas.

Los histogramas de los paneles superiores de las Figuras 17 a 26 dan cuenta del número de eventos (en 30 años) en que no se cumple el caudal ambiental (barras azules) o no se cumple el caudal ambiental más la demanda del H2V (barras verdes); cada evento puede durar múltiples días. La magnitud de dichos eventos de fallas está expresada en Hm^3 (paneles izquierdos) y relativa al caudal ambiental (paneles derechos).

La diferencia entre los dos histogramas (barras de diferente color) muestra cómo cambia la distribución de fallas con la adición de la demanda del H2V, un indicador expresivo del impacto global de la demanda adicional. En general es pequeña, sobre todo en las cuencas grandes; para una magnitud dada de falla, puede ser en ambos sentidos pues la demanda adicional puede profundizar la falla al intervalo de magnitud siguiente.

Los paneles inferiores de las Figuras 17 a 26, por su parte, muestran los indicadores seleccionados (frecuencia global de falla en días a la izquierda y volumen de falla máxima a la derecha) para un valor genérico de demanda. Con el sombreado se indican cuatro valores particulares:

- el caudal ambiental de estiaje y dicho caudal más la demanda de un proyecto grande de H2V definen los límites del primer sombreado,
- el caudal ambiental medio anual y dicho caudal más la demanda de un proyecto grande de H2V definen los límites del segundo sombreado.

Es así que el grosor de los sombreados evidencia el impacto de un proyecto grande de H2V en frecuencia de falla y volumen de falla máxima por sobre la situación de base con el caudal ambiental. Es muy claro que el impacto relativo es ínfimo en cuenca grandes y bastante más notorio en cuencas pequeñas.

Si una cuenca dada tiene una demanda adicional a la ambiental previa a la de un eventual proyecto de H2V entonces el umbral de evaluación se corre a alguna posición del eje de abscisas. Sin embargo, el grosor del sombreado que expresa el impacto adicional de un proyecto de H2V casi no se ve modificado pues depende de la pendiente de las curvas que no tiene grandes cambios en rangos razonables del umbral (p.e. entre los sombreados presentados).

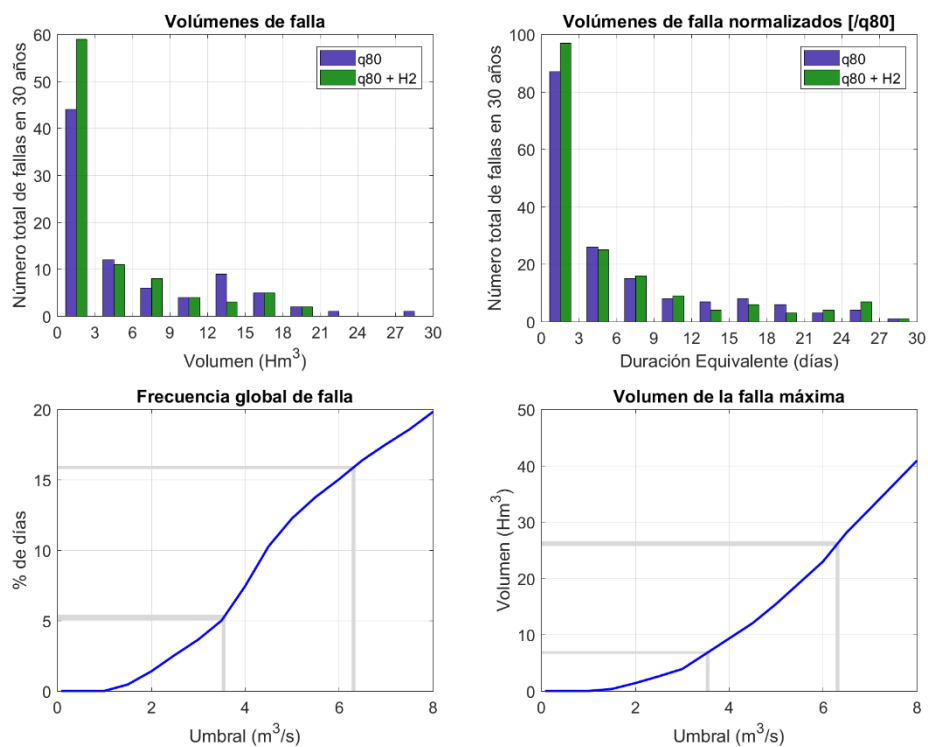


Figura 17: Indicadores de falla para el río Olimar (estación 10.1).

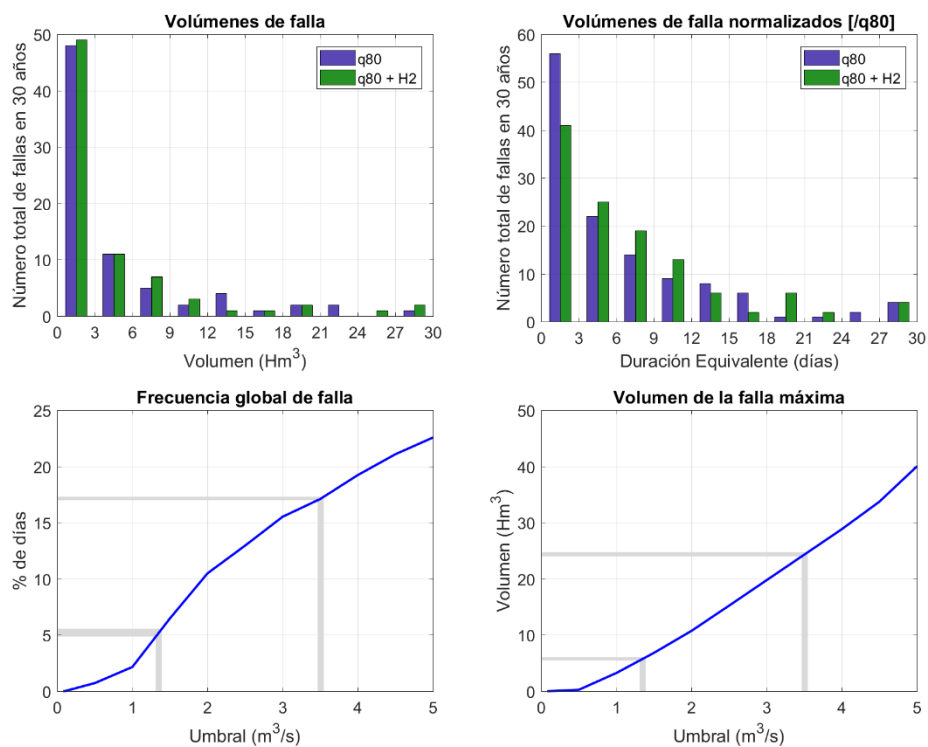


Figura 18: Indicadores de falla para el río Cebollatí (estación 14).

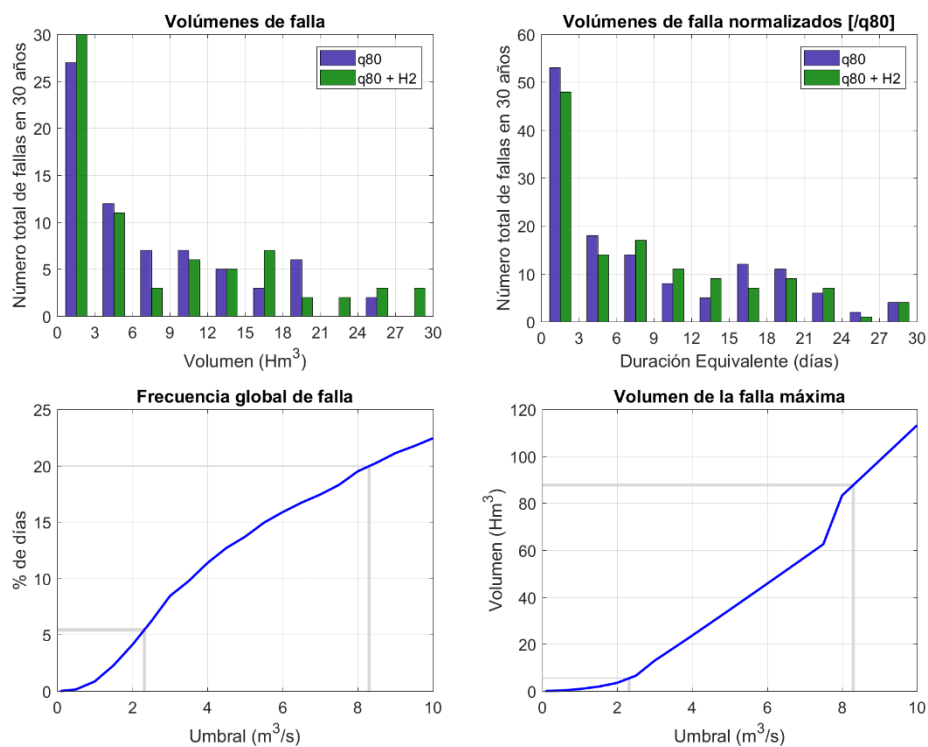


Figura 19: Indicadores de falla para el río Tacuarembó (estación 52).

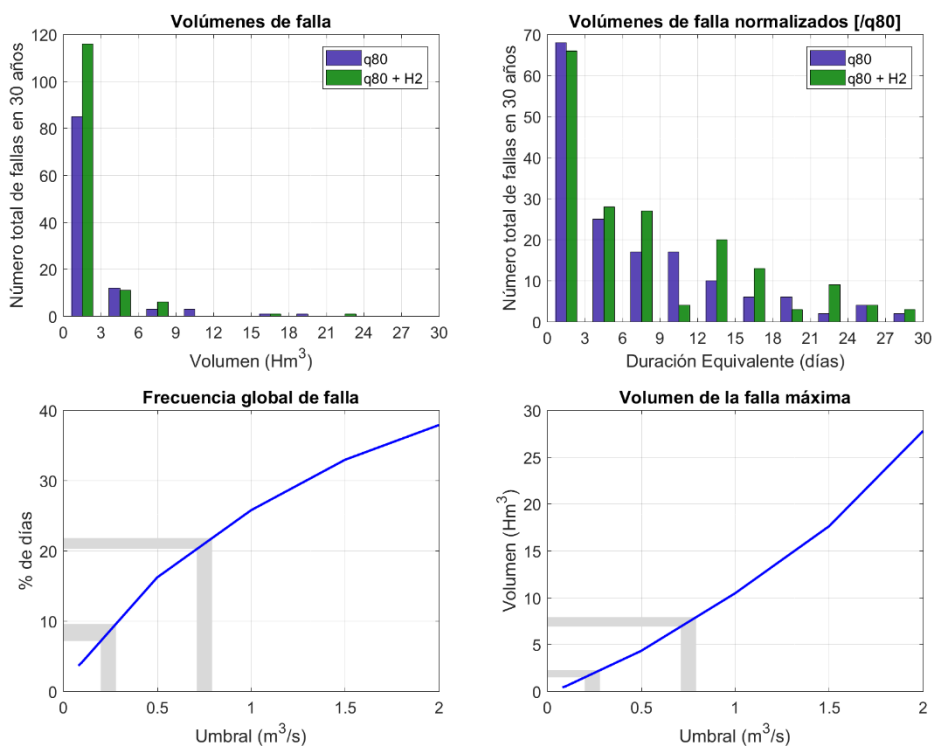


Figura 20: Indicadores de falla para el río Tacuarí (estación 96).

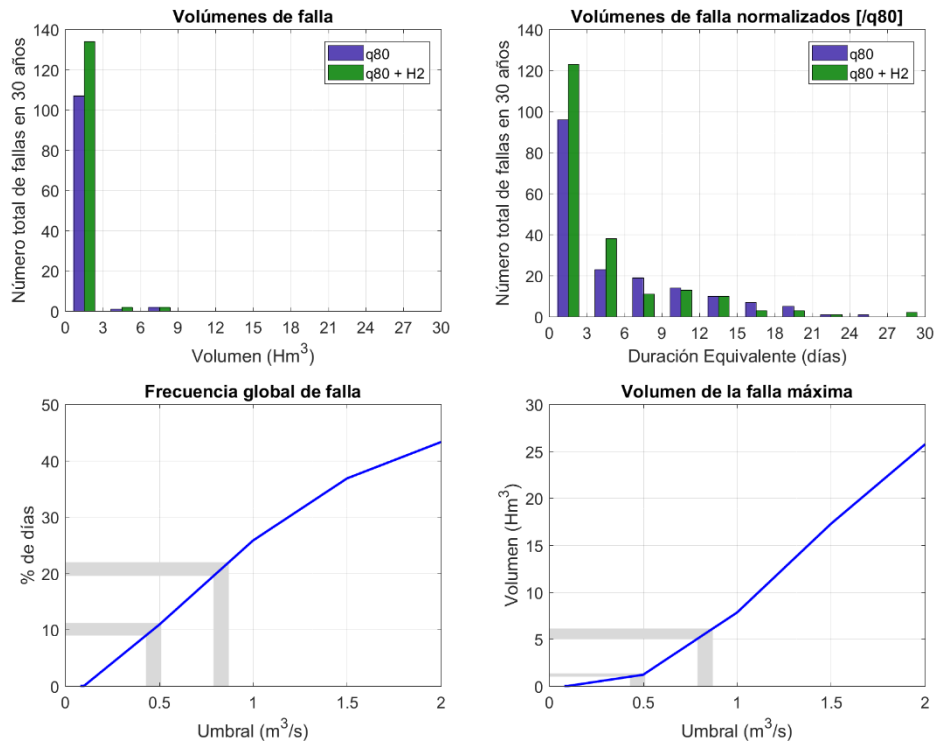


Figura 21: Indicadores de falla para el río Tacuarembó Chico (estación 122).

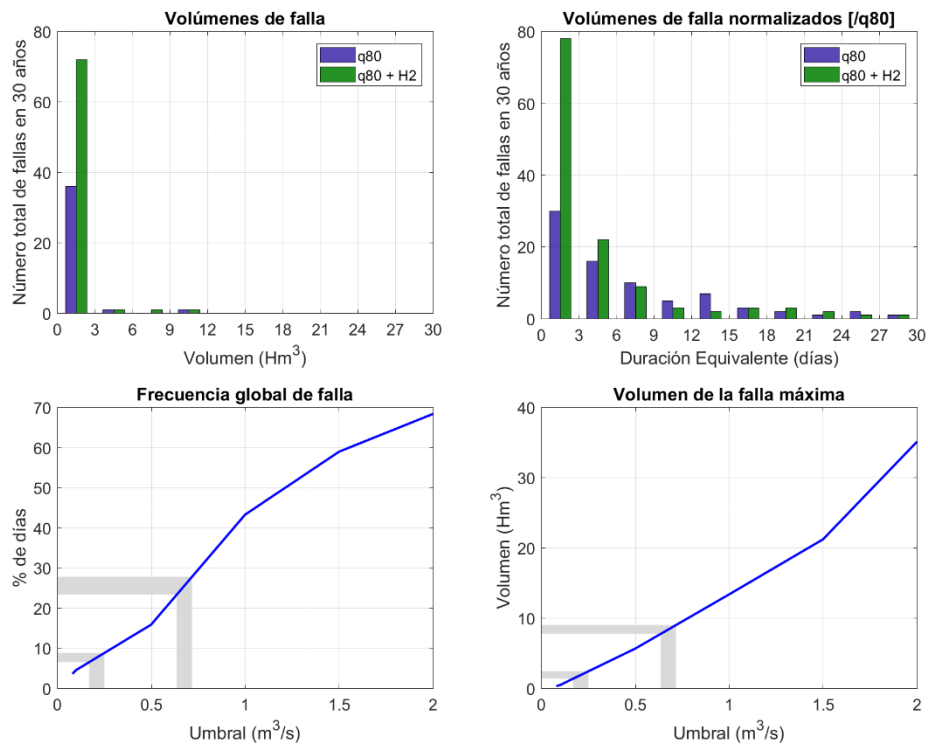


Figura 22: Indicadores de falla para el río San Juan (estación 135).

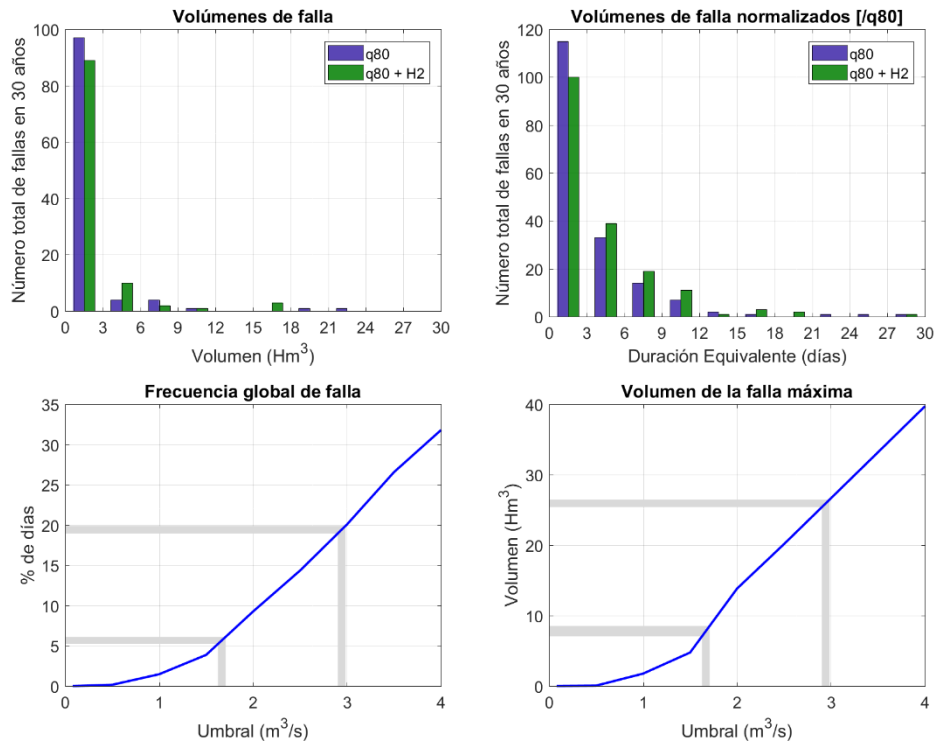


Figura 23: Indicadores de falla para el río Dayman (estación 140).

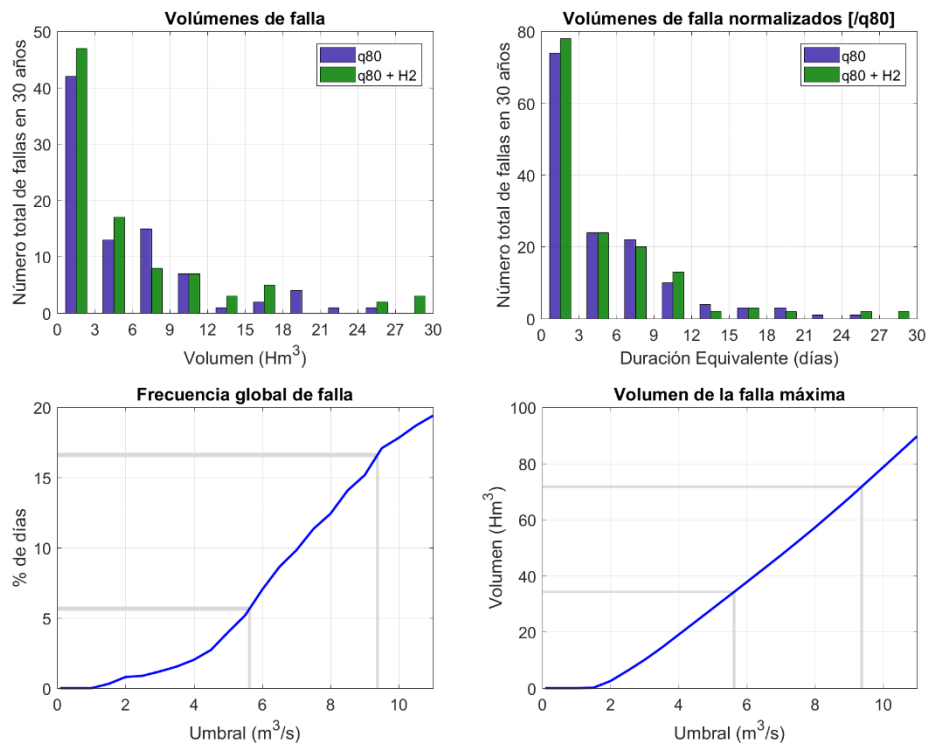


Figura 24: Indicadores de falla para el río Queguay (estación 141).

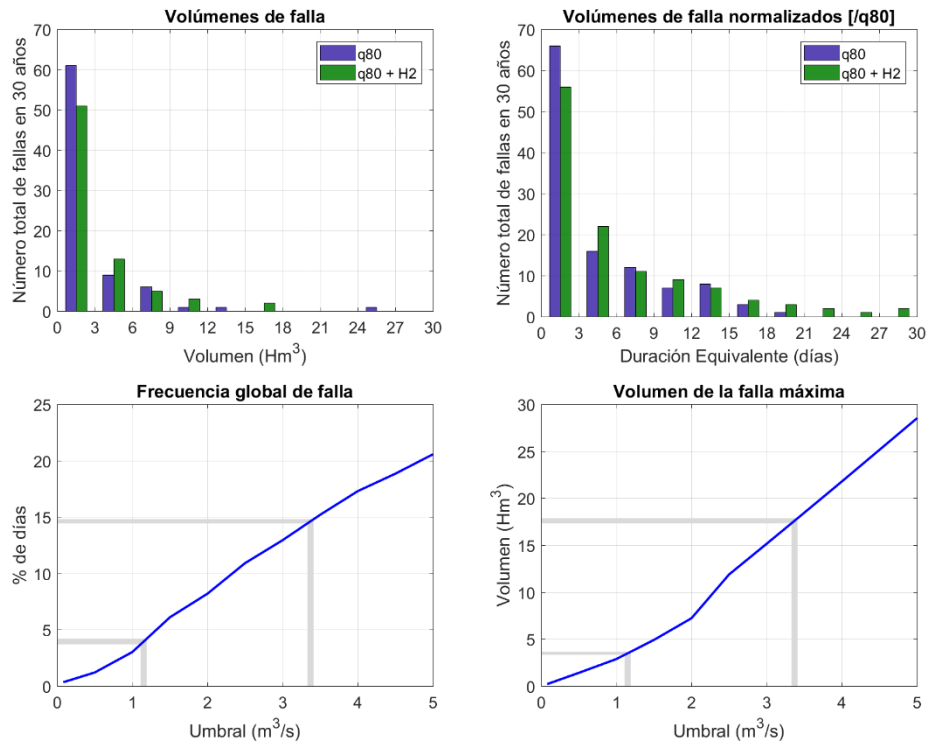


Figura 25: Indicadores de falla para el río Arapey (estación 171).

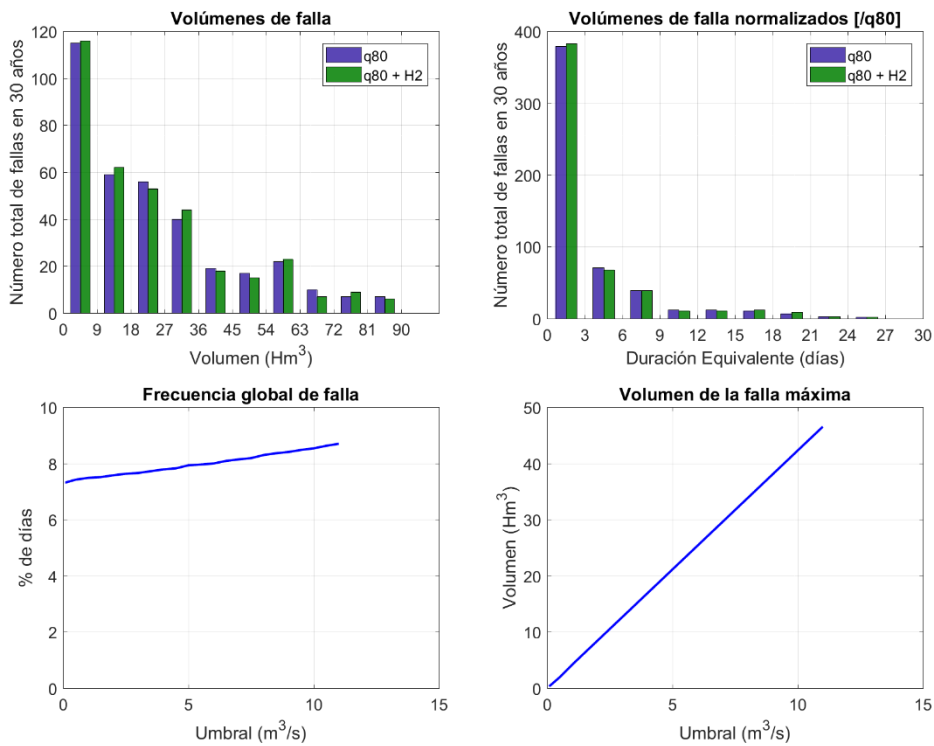


Figura 26: Indicadores de falla para Palmar.

7 ESTUDIOS DE CASO

En este capítulo se presenta la evaluación de tres estudios de casos de producción de H2V y derivados a gran escala (toma de agua de aproximadamente 7.000 m³/d), tomando de distintas fuentes de agua: superficial, subterránea, embalses o una combinación de las anteriores.

La selección de los casos de estudio (presentados en la Figura 27), respecto a sus características y ubicación, se realizó en conjunto con el MIEM:

- **Arapey alto** (subcuenca 13): Complementariedad entre agua subterránea (extraída del acuífero Guaraní) y una toma directa superficial del río Arapey, con caso límite sólo extracción de agua subterránea.
- **Laguna Merín** (subcuencas 41, 43 y 44): Complementariedad entre una toma directa superficial y un embalse, con caso límite sólo embalse.
- **Palmar** (subcuenca 58): Toma directa superficial en el río Negro, aguas abajo de Palmar, con un pólder (embalse artificial llenado por bombeo) para sortear los periodos secos.

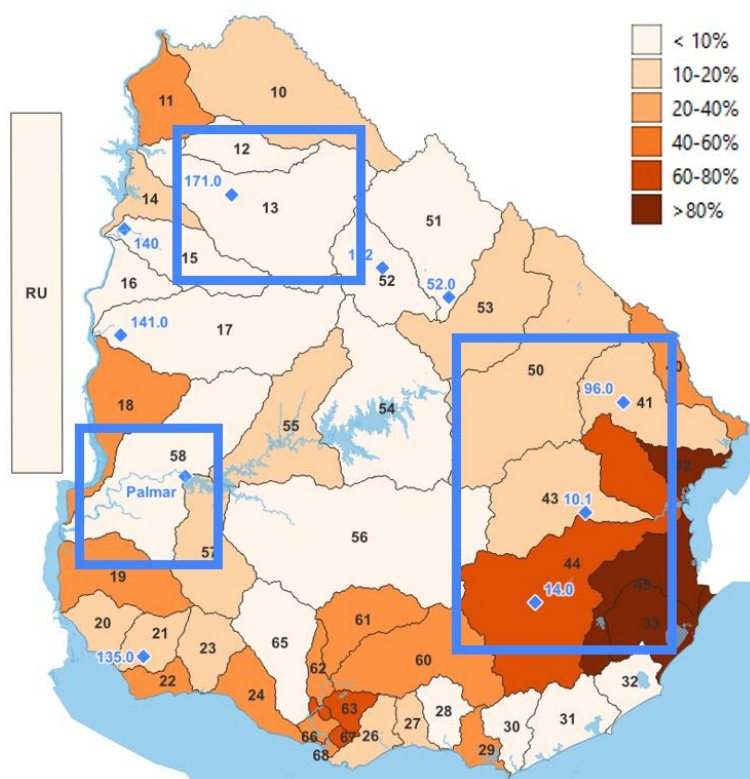


Figura 27: Distribución espacial de los casos de estudio seleccionados sobre el mapa de estrés hídrico obtenido a partir de la demanda máxima y la oferta media para el cuatrimestre Dic-Mar agregando un proyecto de H2V de escala grande a la demanda actual.

Se destaca que, en todos los casos, se asume que durante el proceso de producción de hidrógeno verde el abastecimiento de agua al electrolizador debe de ser continuo, y por lo tanto se busca asegurar “falla cero” o que en caso de “fallas” de abastecimiento se tenga una fuente de agua complementaria.

7.1 Arapey alto

En este caso se analizó la complementariedad entre el agua subterránea (extraída del acuífero Guaraní) y una toma directa superficial del río Arapey alto, considerando como caso límite la satisfacción de la demanda de H2V exclusivamente a partir de agua subterránea.

La disponibilidad del agua superficial en la zona está dada por los datos diarios de caudal registrados en la estación 171 (río Arapey) con una cuenca de aporte de 6.932 km². En cuanto a la disponibilidad de agua subterránea, del informe “*Evaluación y perspectivas del uso del Agua Subterránea para la producción de Hidrógeno Verde y derivados en el marco de la Hoja de Ruta del Uruguay*” surge que en el acuífero Guaraní no se tienen restricciones globales de caudal en relación a la capacidad del acuífero (en el rango de los caudales necesarios para el H2V) y que se requiere alcanzar profundidades de entre 400 y 500 m y verificar la no interferencia con eventuales demandas cercanas.

La metodología seguida comprende los siguientes pasos:

1. Estimación del caudal disponible en el punto de la toma directa superficial, mediante el ajuste de la serie de caudales diarios medidos según el área de la cuenca de aporte a la toma (se consideró un valor de 500 km² de cuenca).
2. Estimación del ciclo medio anual del caudal ambiental que se deberá asegurar aguas abajo de la toma directa (presentado en la Figura 28). El caudal ambiental correspondiente a cada mes se calculó como el caudal con 80% de probabilidad de excedencia (q80), obtenido a partir de la serie de caudales diarios medidos en el periodo 1994-2017.

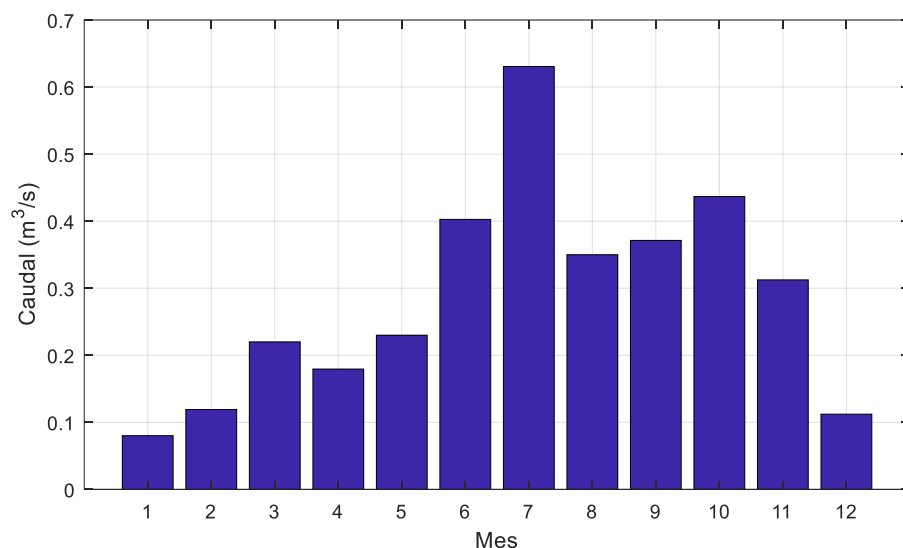


Figura 28: Ciclo medio anual del caudal ambiental que se deberá asegurar aguas abajo de la toma directa en el río Arapey (considerando una cuenca de aporte de 500 km²).

3. Estimación de la oferta de agua superficial disponible para nuevos usos, una vez asegurado el caudal ambiental.
4. Cálculo del déficit hídrico mediante el “Método del nivel umbral” (asumiendo una demanda adicional de 0,081 m³/s para el H2V), dicho déficit deberá ser abastecido a partir del agua subterránea. El resultado obtenido se presenta en la Figura 29.

Por último, en Figura 30 y Figura 31 se presenta la distribución del déficit hídrico expresado como (i) el número de días (8594 días en total) en función del déficit de caudal instantáneo y (ii) el número de años (24 años en total) en función del déficit de volumen acumulado anual, respectivamente.

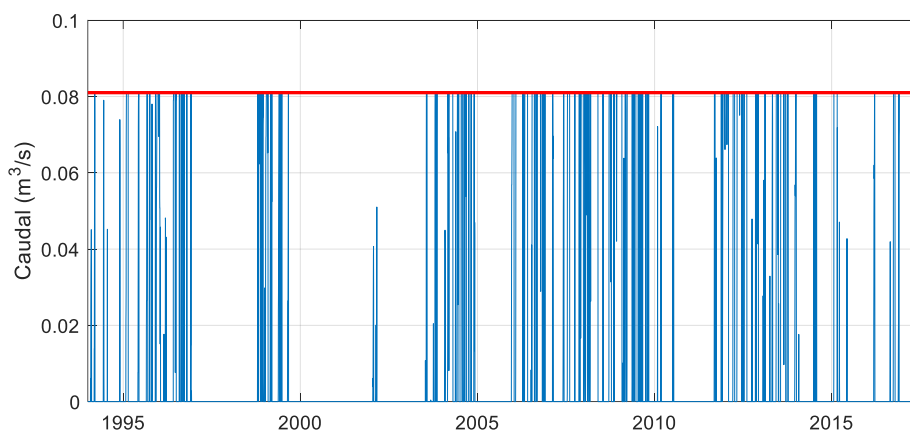


Figura 29: Evolución temporal del déficit hídrico a ser abastecido con agua subterránea (asumiendo una demanda adicional de 0,081 m³/s).

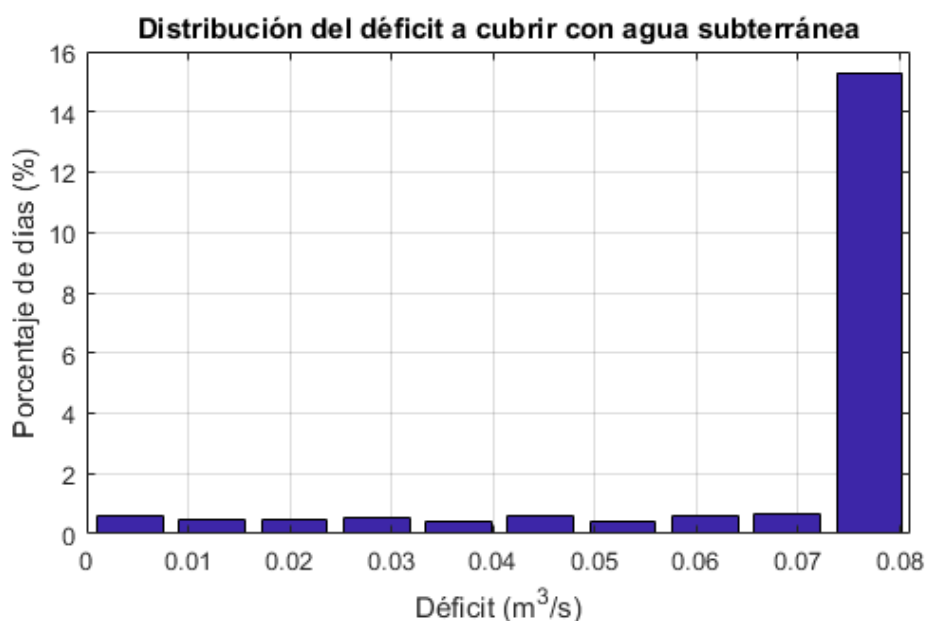


Figura 30: Distribución del déficit hídrico expresado como porcentaje normalizado sobre el total de días en función del déficit de caudal instantáneo.

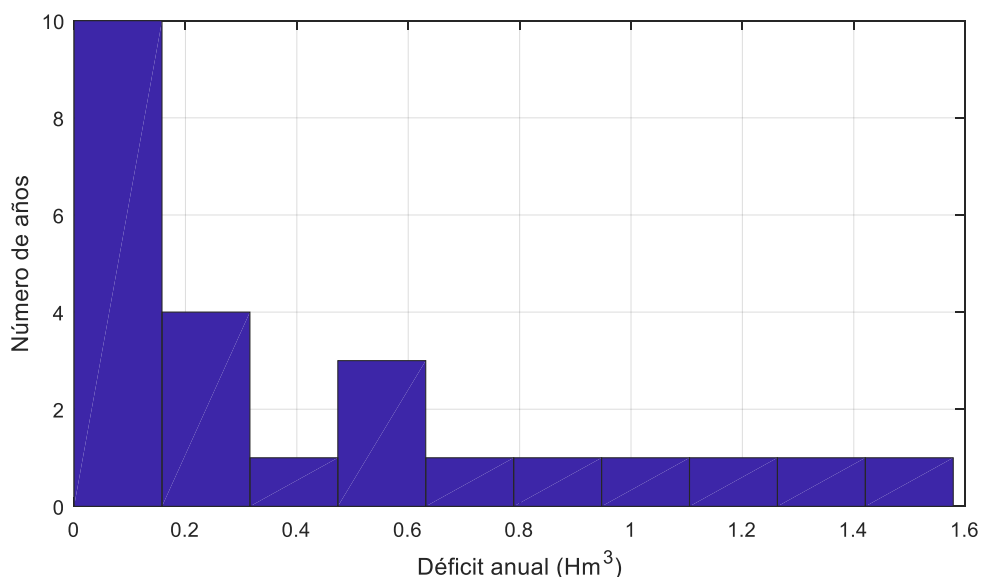


Figura 31: Distribución del déficit hídrico expresado como el número de años en función del déficit acumulado anual (24 años en total).

Se observa que en el periodo analizado se tienen 1719 días (20%) con déficit hídrico, lo que equivale a decir que en el 80% de los días el déficit sería nulo (no se requiere complementar con agua subterránea). Aproximadamente en el 15% de los días el déficit coincide con la

totalidad de la demanda considerada ($0,081 \text{ m}^3/\text{s}$), lo cual se debe a que la oferta de agua superficial disponible es menor o igual al caudal ambiental. En dichos días no sería posible tomar agua del río Arapey para satisfacer la demanda de H2V y se debería abastecer con agua subterránea. En este sentido la Figura 30 determina, además, la cantidad de días en que es necesario la extracción de agua subterránea en función de los caudales requeridos (esto podría ser útil para el diseño del sistema).

En relación al déficit acumulado anual, se observa que en el 75% de los años analizados el déficit es menor o igual a $0,6 \text{ Hm}^3/\text{año}$. El valor máximo del déficit anual es de $1,6 \text{ Hm}^3$ (a modo de referencia, un proyecto de H2V de escala grande consume $2,5 \text{ Hm}^3$ al año).

La hipótesis de 500 km^2 de cuenca de aporte a la toma habrá de ser flexibilizada para hacer compatibles la localización cercana de ambas fuentes (toma y pozo). No se observan problemas de viabilidad en este sentido, en la cabecera del río Arapey se identificaron varias subcuencas sin tomas existentes, con lo cual el criterio de limitar la asignación de tomas superficial al q80 parece no ofrecer restricciones a la asignación de nuevas autorizaciones con los caudales considerados.

7.2 Laguna Merín

En este caso se analizó la complementariedad entre una toma directa superficial y un embalse, considerando como caso límite la satisfacción de la demanda de H2V exclusivamente a partir del embalse.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos empleando los datos correspondientes a la cuenca de aporte a la estación 96 (río Tacuarí). Si bien aquí no se presentan, para las otras dos estaciones disponibles en la zona (Olimar y Cebollatí) se obtuvieron resultados similares.

7.2.1 Embalse

En primer lugar, se analizó la satisfacción de la demanda de H2V mediante la construcción de un embalse localizado en la cuenca de aporte a la estación 96, sin complementariedad con toma directa.

Para ello, se aplicó un balance hídrico de paso mensual al embalse (MVOTMA-DINAGUA-IMFIA, 2011) y se calculó el volumen necesario del embalse en función del área de la cuenca de aporte al mismo para tener “falla cero”.

Como datos de entrada al balance hídrico se consideró:

- Serie mensual de escorrentía (expresada en mm/mes) obtenida del modelo de balance hídrico en la cuenca 41 (disponible en el periodo 1980-2023).

- Precipitación mensual registrada en la estación INIA Treinta y Tres (disponible en el periodo 1980-2023).
- Ciclo medio anual de evaporación de Tanque A registrado en la estación INUMET Treinta y Tres (se consideró un coeficiente de tanque de 0,70).
- Curva que relaciona el área inundada y el volumen almacenado por el embalse (curva A-V), ajustada a partir de los embalses registrados al 2019 (presentada en el Anexo III).
- Ciclo medio anual del caudal ambiental (q_{70}) que se deberá asegurar aguas abajo del embalse, calculado a partir de la serie de caudales diarios registrados en la estación 96 ajustada según el área de la cuenca de aporte al mismo. A modo de referencia, en la Figura 32 se presenta cómo varía el volumen acumulado anual reservado para el caudal ambiental en función del área de la cuenca (entre 1 y 50 km²).
- Demanda de un proyecto de H2V de escala grande: 7.000 m³/día, que equivale a un volumen acumulado mensual de 210.000 m³.

El balance hídrico se calculó para el periodo común de datos (1994-2023).

En la Figura 33 se presentan los resultados del volumen del embalse mínimo necesario para satisfacer la demanda dada una cuenca de aporte. Se observa que, para cuencas chicas, el volumen necesario del embalse descende al aumentar el área de la cuenca de aporte al mismo hasta un valor mínimo (2,1 Hm³ para 9,6 km²), luego del cual el volumen tiene un comportamiento creciente con la cuenca. Esto responde a que en el primer tramo “limita” la cuenca de aporte al embalse, pero una vez superado cierto umbral, el beneficio de aumentarla es menor a la exigencia del caudal ambiental a preservar, la cual pasa a dominar e implica un aumento del volumen del embalse necesario.

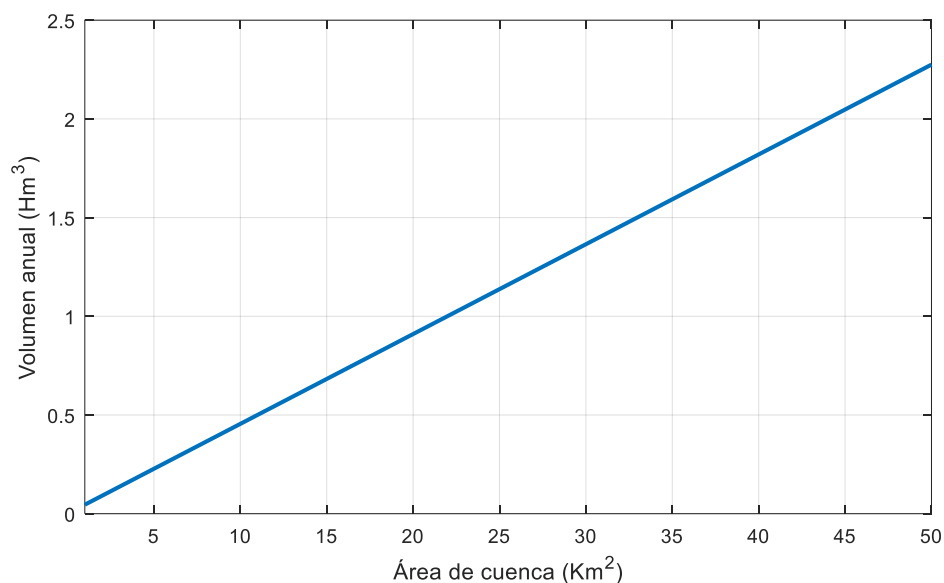


Figura 32: Variación del volumen acumulado anual reservado para el caudal ambiental en función del área de la cuenca de aporte al embalse.

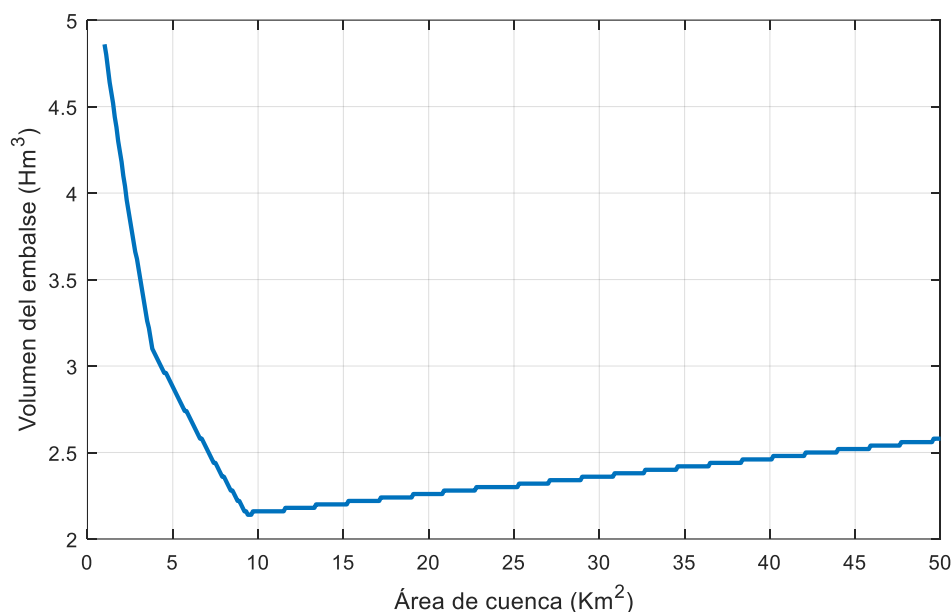


Figura 33: Curva paramétrica del volumen del embalse en función del área de la cuenca de aporte al mismo para tener “falla cero”.

7.2.2 Embalse + Toma directa

Se analizó luego la complementariedad entre una toma directa superficial en el río Tacuarí y un embalse localizado aguas arriba de la misma.

La disponibilidad del agua superficial en la zona está dada por los datos diarios de caudal registrados en la estación 96 (río Tacuarí) con una cuenca de aporte de 1.425 km².

La metodología seguida comprende los siguientes pasos:

1. Estimación del caudal disponible en el punto de la toma directa superficial, mediante el ajuste de la serie de caudales diarios medidos según el área de la cuenca de aporte a la toma (se consideró un valor de 500 km² de cuenca).
2. Estimación del ciclo medio anual del caudal ambiental (q80) que se deberá asegurar aguas abajo de la toma directa (presentado en la Figura 34). El caudal ambiental correspondiente a cada mes fue obtenido a partir de la serie de caudales diarios medidos en el periodo 1994-2023.

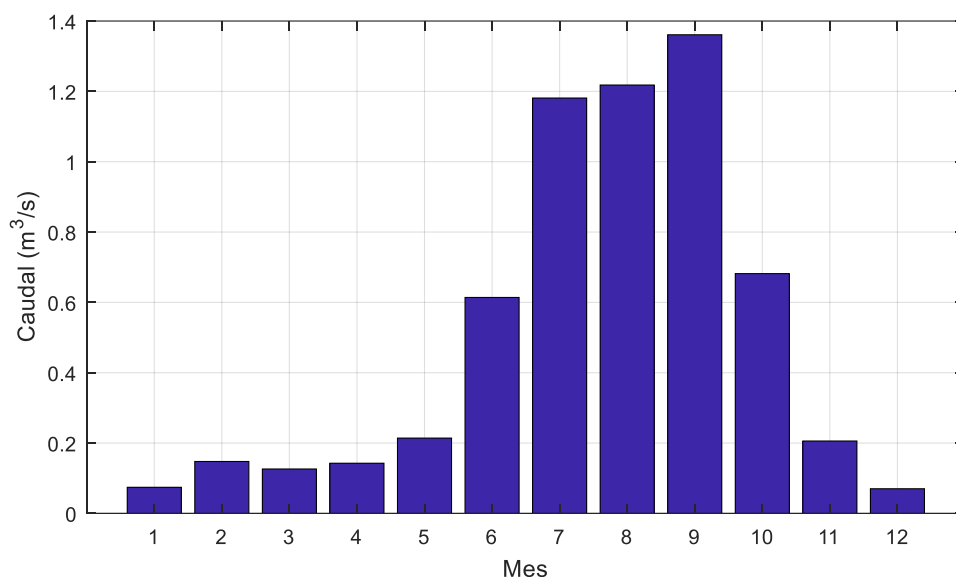


Figura 34: Ciclo medio anual del caudal ambiental que se deberá asegurar aguas abajo de la toma directa en el río Tacuarí (considerando una cuenca de aporte de 500 km²).

3. Estimación de la oferta de agua superficial disponible para nuevos usos, una vez asegurado el caudal ambiental.
4. Cálculo del déficit hídrico mediante el “Método del nivel umbral” (asumiendo una demanda adicional de 0,081 m³/s para el H2V), dicho déficit deberá ser abastecido a partir del embalse. El déficit acumulado anual resultante se presenta en la Figura 35 (a modo de referencia, un proyecto de H2V de escala grande consume 2,5 Hm³ al año).

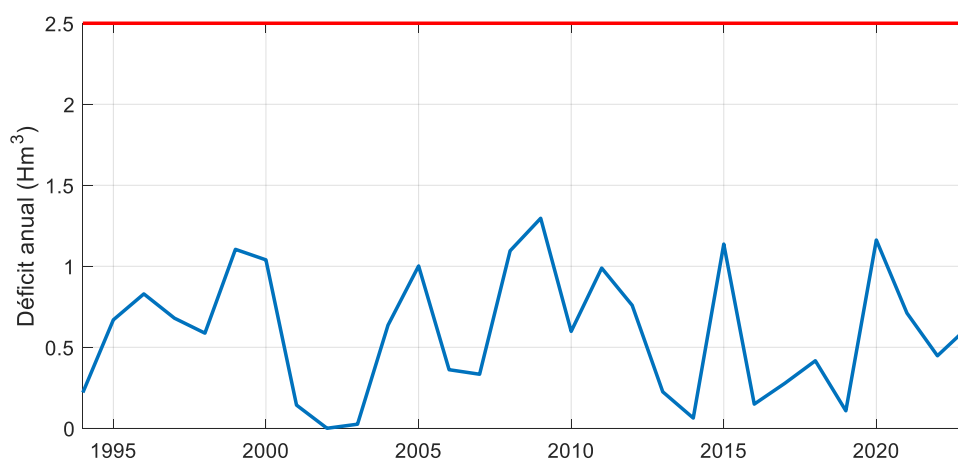


Figura 35: Evolución temporal del déficit hídrico acumulado anual a ser abastecido a partir del embalse (asumiendo una demanda adicional de 0,081 m³/s).

5. Resolución del balance hídrico de paso mensual al embalse, considerando como demanda el déficit hídrico mensual calculado anteriormente y el caudal ambiental (q_{70}).
6. Cálculo del volumen del embalse mínimo necesario en función del área de la cuenca de aporte al mismo para tener “falla cero”.

En la Figura 36 se presentan los resultados obtenidos, en comparación con el caso “sólo embalse”.

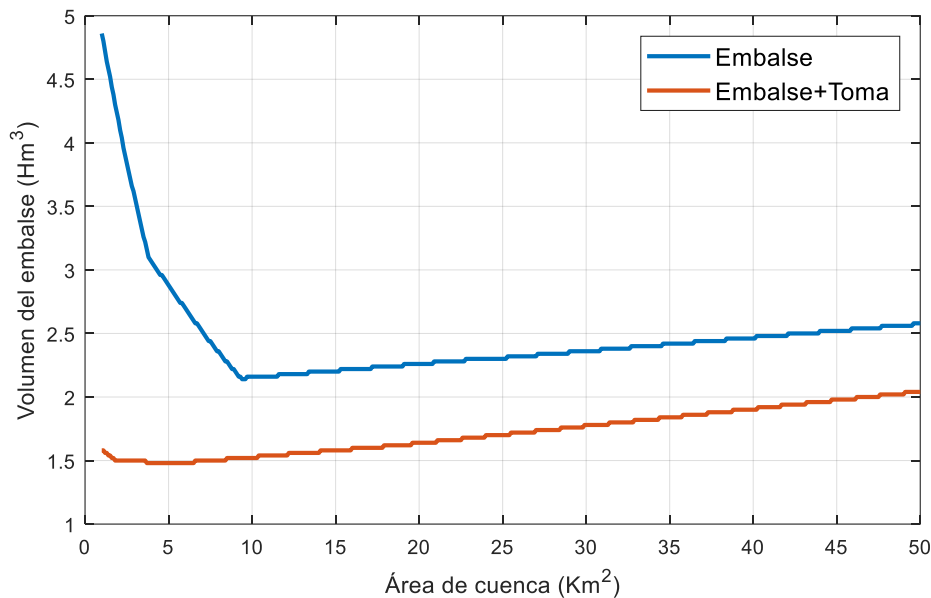


Figura 36: Curva paramétrica del volumen del embalse en función del área de la cuenca de aporte al mismo para tener “falla cero” para: (i) Embalse y (ii) Embalse + Toma directa.

La complementariedad con la toma directa reduce el tamaño del embalse necesario para tener falla cero, de 2,1 Hm³ a 1,5 Hm³ con cuencas levemente menores, en el entorno de 5 km². A su vez se entiende que el caudal de diseño de la obra de toma en el embalse deberá ser acorde al máximo caudal instantáneo necesario (0,081 m³/s).

Las hipótesis de 500 km² de cuenca de aporte a la toma y el resultado de embalse óptimo de 5 km² de cuenca de aporte, que naturalmente ocurrirá en un afluente al río Tacuarí, habrán de ser flexibilizados para hacer compatibles la localización cercana de ambas fuentes (toma y embalse). No se observan problemas de viabilidad en este sentido, por ejemplo en el arroyo Chuy se identificó una subcuenca sin tomas existentes, con lo cual el criterio de limitar la asignación de tomas superficial al q_{80} parece no ofrecer restricciones a la asignación de nuevas autorizaciones con los caudales considerados. Por el contrario, en la cabecera del río Tacuarí la toma de OSE para la ciudad de Melo parece ser una limitante severa a la asignación de nuevas autorizaciones.

7.3 Palmar

El tercer caso de estudio consiste en una toma directa superficial en el río Negro, aguas abajo de Palmar, con un polder (embalse artificial llenado por bombeo) para sortear los periodos secos.

En primer lugar, dado que en la serie disponible de caudales erogados en Palmar se identificaron numerosos días con caudal nulo (se recuerda que las centrales hidroeléctricas están al momento excluidas de la aplicación del Decreto de caudales ambientales, Artículo 17 del Decreto 368/018), se analizó la distribución de la longitud de los días consecutivos (rachas) con caudal erogado nulo (Figura 37).

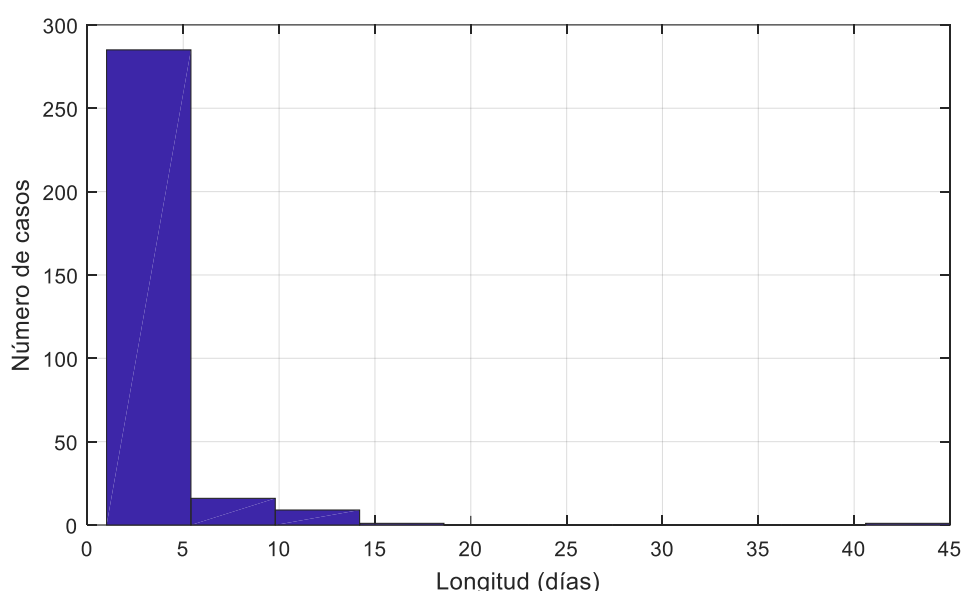


Figura 37: Distribución de la longitud de días consecutivos con caudal erogado nulo en Palmar.

Luego se calculó el déficit hídrico mediante el “Método del nivel umbral”, asumiendo una demanda adicional de 0,081 m³/s para el H2V. En la Figura 38 se presenta la evolución temporal del déficit hídrico expresado como caudal instantáneo en el periodo de estudio (1994-2023).

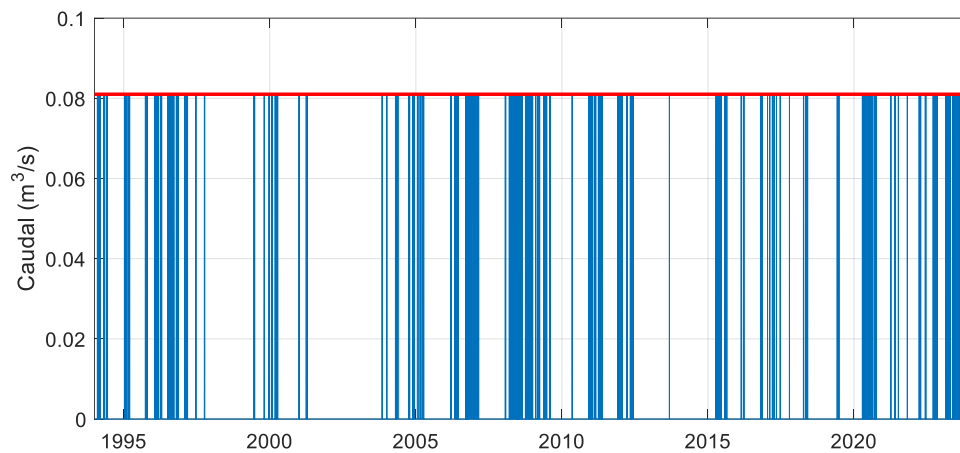


Figura 38: Evolución temporal del déficit hídrico expresado como caudal instantáneo (considerando una demanda adicional de 0,081 m³/s).

Por último, en la Figura 39 se presenta la evolución del déficit hídrico acumulado anual.

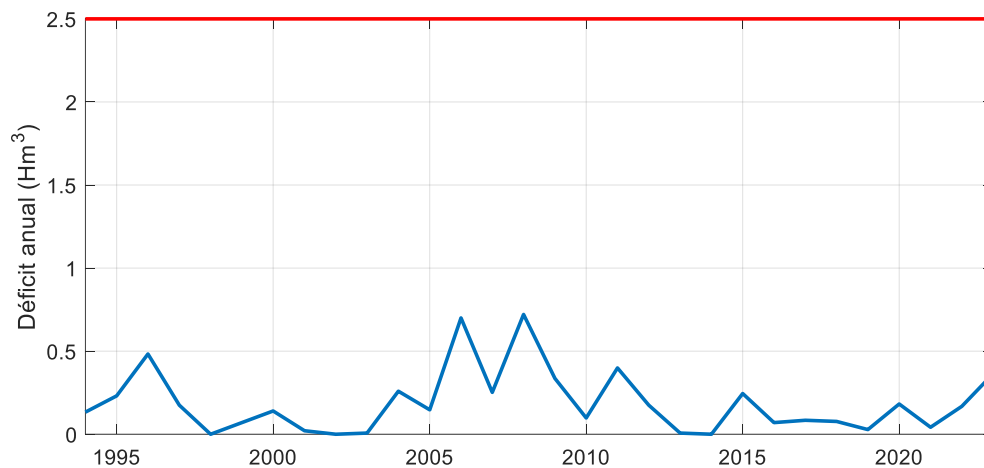


Figura 39: Evolución temporal del déficit hídrico acumulado anual.

Asimismo, se destaca que el volumen de la falla máxima ocurrida en el periodo analizado (30 años) es de 0,315 Hm³ y se corresponde con una racha de 45 días consecutivos con caudal nulo. Esto determina el dimensionamiento de un pólder (0,315 Hm³) con el requerimiento de falla cero en el período histórico.

8 PROPUESTA DE RECOMENDACIONES

En esta sección se presentan algunas apreciaciones y recomendaciones que sirven de insumo para los instrumentos de gestión del agua y la Evaluación Ambiental Estratégica en relación al uso de agua de los emprendimientos de Hidrógeno Verde en Uruguay. Las mismas son el resultado de sucesivos intercambios con el Ministerio de Ambiente (MA) y el Ministerio de Industria Energía y Minería (MIEM).

El aumento de la variabilidad hidro-climática hace que en forma creciente se perciba a la vez escasez y abundancia de agua. La memoria reciente de períodos de escasez extrema (como la sequía del 2023) cuestiona la asignación de usos nuevos o incluso los ya autorizados. Por otro lado, es claro que los estiajes extremos no pueden ser la referencia para la asignación de usos. Este problema no es nuevo, pero se ha visto agravado por el aumento de la variabilidad hidro-climática y la percepción ciudadana que naturalmente se preocupa por las prioridades del agua potable y la protección del ambiente.

Según surge de lo presentado, la demanda de agua para el hidrógeno verde no presenta ninguna característica diferencial a otros usos existentes ni en volumen, ni en concentración geográfica, y tampoco tiene la estacionalidad asociada a la demanda de riego que es máxima cuando la oferta de caudales naturales es mínima.

Es así que, no hay argumentos técnicos que justifiquen una política diferencial en la autorización de concesiones de agua para la industria del hidrógeno verde. Tampoco el número de proyectos que involucraría la Hoja de Ruta a 2040 justifica una evaluación ambiental estratégica en relación al uso de agua. Por supuesto, los permisos de autorización de uso de agua seguirán los procedimientos usuales de evaluación de DINAGUA y esos son suficiente salvaguarda para la protección de los recursos hídricos y servicios ecosistémicos asociados. De todos modos, a continuación, se hacen algunas apreciaciones que podrían sí ser consideradas atendiendo a algunas características específicas, discriminando según el tipo de aprovechamiento.

Embalses

De los análisis realizados surge claramente que la eventual presión de la industria del hidrógeno verde a través de este tipo de aprovechamientos no representa un estrés significativo al recurso hídrico. Se presupone, claro está, que dichas autorizaciones seguirán los mismos análisis que hoy siguen todos los aprovechamientos en particular los dedicados al riego. El mucho menor volumen involucrado en esta industria, respecto a los aprovechamientos ya existentes para riego, no justifica ninguna consideración específica.

Tomas

Como ya se mencionó, un elemento diferenciador de la demanda del hidrógeno verde -como es normal en otros usos industriales- respecto de la demanda de riego (uso dominante en las tomas) es que es uniforme en el año y no concentrada en el verano.

Con el nivel actual de presión sobre el recurso, los caudales adjudicables ya son una limitante, especialmente en verano, sea que ya estén agotados o aún no totalmente.

Es razonable considerar un criterio diferencial de adjudicación para demandas de H2V -y eventualmente otras demandas industriales- que sea más laxa fuera de la temporada estival (donde el recurso está menos presionado) y/o más severa en la temporada estival, de modo de reservar el recurso para usos zafrales. Esto flexibilizaría la autorización fuera de temporada, por un lado, y, por el otro, obligaría a contar con otra fuente de respaldo (reservorio, embalse, agua subterránea) para abastecer la industria durante el verano.

El criterio actual de adjudicación es cronológico; si hay disponibilidad se asigna al primero que haga la solicitud. Parece un criterio un tanto arbitrario y ha llevado a problemáticas severas a nivel internacional. Puede considerarse un criterio alternativo que priorice el uso para riego en verano y flexibilice la asignación para hidrógeno verde u otros usos el resto del año.

Pozos

Las solicitudes de derecho de uso de aguas subterráneas para la industria del hidrógeno verde van a seguir, considerando los caudales instantáneos necesarios y volúmenes anuales, los criterios más exigentes en relación a la información solicitada según la normativa actual. Este es el resguardo principal para garantizar el uso sustentable del recurso.

Una consideración adicional que se podría tomar en la política de asignación es la de proteger preventivamente el uso de aguas subterráneas poco profundas para pequeños usuarios (domiciliarios o de riego de pequeña escala) que no cuentan con otras fuentes de agua ni capacidad de inversión para pozos profundos. Esta política conduciría a exigir a emprendimientos industriales que se desarrollan en el medio rural, como el hidrógeno verde, a tomar agua de capas más profundas.

9 COMUNICACIÓN DE RESULTADOS

En la Tabla 6 se presenta un resumen de las instancias de reuniones y presentaciones realizadas a lo largo del desarrollo del convenio.

Tabla 6: Resumen de las instancias de reuniones y presentaciones realizadas a lo largo del desarrollo del convenio.

Evento	Fecha
Reuniones de trabajo con MIEM y MA	21 de febrero 15 de abril 26 de junio 21 de agosto 31 de octubre 6 de noviembre 5 de diciembre
Reuniones de trabajo con MIEM y AUSENCO	17 de julio 15 de noviembre
<i>"Estrategia de análisis de disponibilidad de agua superficial para proyectos de H2V"</i> Mesa de diálogo: "Uso sustentable del agua en proyectos de hidrógeno verde" IX Congreso Latam Renovables, AUDER	26 de julio (2023)
<i>"Aportes para el desarrollo sostenible del hidrógeno"</i> Semana de la Ciencia y la Tecnología 2024 (Polo Educativo Tecnológico UTU, Tacuarembó)	6 de agosto
<i>"Estudio de disponibilidad de recursos hídricos para producción de H2 y derivados"</i> Mesa "Hidrógeno verde y derivados: oportunidades y retos para Uruguay con una mirada ambiental" XII Congreso Nacional de AIDIS (Montevideo)	17 de octubre
<i>"Hidrógeno verde y el ciclo del agua"</i> Jornada Académica - Ingeniería en Energías Renovables (UTEC Durazno)	23 de octubre
Jornada Académica en Hidrógeno Verde Panel Área Ambiente (Paysandú)	11 de noviembre
<i>"Estudio sobre el uso del agua en proyectos de H2V"</i> Mesa: "EIA en actividades emergentes en el país" Conmemoración de 30 años de la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental. (Montevideo)	19 de noviembre
<i>"Disponibilidad de recursos hídricos"</i> Puesta a punto de la hoja de ruta del hidrógeno verde y derivados (Montevideo)	17 de diciembre

10 RESUMEN Y COMENTARIOS FINALES

En primer lugar, se realizó una revisión bibliográfica sobre el uso del agua en el proceso de producción de H₂V. En la misma se consideraron los distintos aspectos que influyen en la cantidad de agua que se debe tomar de una determinada fuente para producir H₂, así como los requerimientos de calidad del agua involucrada en las distintas etapas del proceso de producción. Como principal concepto se estableció que se consumen 9 L de agua ultrapura para producir 1 kg de H₂ (esta agua es consumida en el proceso de electrólisis, la misma retorna al ciclo hidrológico, pero no de forma inmediata). Si bien el proceso de refrigeración implica la toma de agua de la fuente para operar, en este caso el agua vuelve al ciclo hidrológico de forma más inmediata ya sea como agua de desecho o como evaporación. Se analizaron las diferencias en los caudales tomados de la fuente de agua diferenciando por tecnología, donde se llegó a que la electrólisis PEM presenta valores del orden de 20% menores que la electrólisis alcalina. A su vez, se establecieron requerimientos en cuanto a la calidad del agua que ingresa al electrolizador (agua ultrapura) y el agua de refrigerado, así como las principales tecnologías de tratamiento que se utilizan para alcanzar estas características: ósmosis inversa e intercambio iónico. Los valores presentados no incluyen escenarios de reúso o retorno del agua (no estequiométrica) a la fuente, con lo cual se trata, en ese aspecto, de un escenario conservador.

Se procedió luego a la caracterización global de la oferta del recurso hídrico superficial a partir de la información proporcionada por la DINAGUA. Por un lado, se debe cuantificar la disponibilidad/oferta de agua y, por el otro, se debe estimar la demanda actual del recurso hídrico (considerando los usos actualmente autorizados). Para ello, se dispuso de información sobre: (i) escurrimientos mensuales simulados en las cuencas Nivel 3; (ii) caudales diarios erogados en Salto Grande; (iii) volúmenes anuales de demanda (otorgados o en estudio) discriminados por tipo de obra, uso y subcuenca Nivel 2. A partir de dicha información se determinó el grado de regulación/estrés hídrico actual para cada una de las cuencas Nivel 2, definido como el cociente entre el volumen otorgado y la oferta de agua. Para el cálculo del grado de estrés hídrico se consideraron dos casos de oferta del recurso (la mediana y el percentil 5 del período considerado) y una demanda máxima (obtenida como el máximo de los volúmenes otorgados en los últimos cinco años disponibles). Con el propósito de contemplar la variabilidad estacional, además del análisis anual (en base a acumulados anuales), se realizó un análisis para el período de estiaje (en base a acumulados en el cuatrimestre Dic-Mar). Como resultado se construyeron los mapas del estrés hídrico (actual) para todo el Uruguay en cada una de las situaciones consideradas.

Posteriormente, se realizó la comparación global entre la oferta y la demanda del recurso hídrico para dos escenarios de demanda de H₂V: (i) un proyecto de escala mediana (toma de agua de aproximadamente 1000 m³/d) por cuenca Nivel 2; (ii) un proyecto de escala grande (toma de agua de aproximadamente 7000 m³/d) por cuenca Nivel 2. En el caso del Río Uruguay, considerando que la oferta de agua es notoriamente mayor, se adoptó una demanda equivalente a 10 proyectos de H₂V de cada escala. Para cada uno de estos escenarios se construyeron los mapas del estrés hídrico, de forma análoga a la seguida para la demanda

actual, adicionando a esta la demanda del proyecto de H2V según corresponda. Adicionalmente, se construyeron los mapas del “ratio de demandas”, obtenido como el cociente entre la demanda de H2V (para proyectos de escala mediana y grande) y la demanda actual del recurso hídrico en cada subcuenca Nivel 2 (muestra qué porcentaje de la demanda actual representarían los proyectos de H2V).

A escala de subcuenca Nivel 2, los mapas de estrés hídrico para la demanda máxima actual muestran la relevancia de considerar la variabilidad temporal y espacial de la oferta de agua. La variabilidad temporal incluye tanto la estacionalidad como la variabilidad interanual. Existen varias cuencas superficiales que sufren escasez hídrica con las demandas y variabilidad climática actual y no soportan más presión sobre el recurso (sobre todo en estiaje). En particular, puede verse que considerando la oferta mínima (P5 en verano) y la demanda máxima de los últimos años en cada cuenca, la mayor parte de las cuencas de Uruguay muestran un estrés superior al 80%.

Al considerar sobre la demanda máxima actual, un proyecto de H2V (grande o mediano), el impacto en el estrés hídrico no cambia significativamente en relación a la situación actual.

Naturalmente, estos resultados responden a la escala espacial (cuencas Nivel 2) y a la escala temporal (escurrimientos acumulados anuales y estacionales) consideradas en la primera parte del estudio (Actividad 1).

Por otra parte, en la Actividad 2, se realizó una caracterización específica de la oferta del recurso hídrico superficial y su potencial uso para la producción de H2 en Uruguay. Para ello, se dispuso de datos diarios de caudal en diez cuencas, las cuales fueron seleccionadas distribuidas a lo largo de todo el país, de forma de contemplar las variaciones espaciales en la precipitación, en la evapotranspiración potencial y en los suelos, además de tener distinta extensión superficial.

En cuanto a la demanda actual del recurso hídrico superficial, se dispuso de los volúmenes anuales otorgados o en estudio, discriminados por tipo de obra, uso y subcuenca Nivel 2. A partir de dicha información, para cada una de las cuencas seleccionadas, se calcularon dos indicadores de falla mediante el “Método del nivel umbral” y se analizó su evolución en función de un umbral genérico que representa la demanda adicional:

- (i) frecuencia global, expresada como el porcentaje de días de falla;
- (ii) volumen acumulado de la falla mayor, expresado en Hm^3 .

Adicionalmente, se analizó la distribución de los volúmenes de las fallas para ciertos umbrales específicos de interés (demanda ambiental y demanda ambiental más la demanda de un proyecto de H2V de escala grande). Los resultados se presentan con los volúmenes expresados en Hm^3 y normalizados según el caudal ambiental, con lo cual quedan expresados en unidades de tiempo (días) y se pueden interpretar como la duración de una falla equivalente de profundidad igual al caudal ambiental. Por definición el caudal ambiental tiene “fallas” aún sin demandas antrópicas adicionales (ya que se define como el caudal con 80% de

permanencia). Estas “fallas” se ven afectadas, en general levemente, por demandas adicionales como puede ser el H2V.

Luego, se realizó la evaluación de tres estudios de casos de producción de H2V y derivados a gran escala tomando de distintas fuentes de agua: superficial, subterránea, embalses o una combinación de las anteriores. La selección de los casos de estudio, respecto a sus características y ubicación, se realizó en conjunto con el MIEM:

- (i) Arapey alto, se analizó la complementariedad entre agua subterránea (extraída del acuífero Guaraní) y una toma directa superficial del río Arapey, con caso límite sólo extracción de agua subterránea;
- (ii) Laguna Merín, se analizó la complementariedad entre una toma directa superficial y un embalse, con caso límite sólo embalse;
- (iii) Palmar, se evaluó una toma directa superficial en el río Negro, aguas abajo de Palmar, con un polder (embalse artificial llenado por bombeo) para sortear los periodos secos.

En el análisis de viabilidad de los tres casos se contempló el actual criterio que aplica la Administración para el otorgamiento de nuevos aprovechamientos de tomas directas (autorizar hasta un caudal máximo -acumulado entre todas las tomas- igual al caudal con 80% de probabilidad de excedencia). De los resultados obtenidos se desprende que, en volúmenes anuales, la demanda de agua del H2V es insignificante en relación a los flujos naturales en la mayoría de las cuencas.

La solución con embalse no presenta limitaciones generales y requiere tamaños habituales en embalses para riego. Salvo en el Río Uruguay, donde el caudal mínimo histórico (1945) es más de 100 veces mayor a los requerimientos de agua para toda la Hoja de Ruta 2040, la solución por toma directa superficial exclusivamente presenta generalmente restricciones de permisos y/o de disponibilidad en períodos de estiaje, por lo que para asegurar el abastecimiento continuo de agua, es necesario contar con una fuente de respaldo (subterránea, embalse).

Finalmente, se realizaron algunas apreciaciones y recomendaciones que pueden servir como insumos para la definición de nuevos criterios en la asignación de derecho de usos de agua o para herramientas de gestión ambiental, como puede ser la Evaluación Ambiental Estratégica (EAE) en relación al uso del agua de los emprendimientos de Hidrógeno Verde en Uruguay. Las mismas son el resultado de sucesivos intercambios con el Ministerio de Ambiente (MA) y el Ministerio de Industria Energía y Minería (MIEM). Según surge de lo presentado, la demanda de agua para el hidrógeno verde no presenta características muy diferenciales a otros usos existentes ni en volumen, ni en ubicación geográfica y tampoco tiene la estacionalidad asociada a la demanda de riego que es máxima cuando la oferta de caudales naturales es mínima. Es así que no hay argumentos técnicos que justifiquen una política diferencial en la autorización de concesiones de agua para la industria del hidrógeno verde. Por supuesto, los permisos de autorización de uso de agua seguirán los procedimientos

usuales de evaluación de DINAGUA y esos son suficiente salvaguarda para la protección de los recursos hídricos y servicios ecosistémicos asociados. De todos modos, se propusieron algunas recomendaciones atendiendo a algunas características específicas y discriminando según el tipo de aprovechamiento.

- Embalses: La eventual presión de la industria del hidrógeno verde a través de este tipo de aprovechamientos no representa un estrés significativo al recurso hídrico. El mucho menor volumen involucrado en esta industria, respecto a los aprovechamientos ya existentes para riego, no justifica ninguna consideración específica.
- Tomas: Es razonable considerar un criterio diferencial de adjudicación para demandas de H2V -y eventualmente otras demandas industriales- que sea más laxa fuera de la temporada estival (donde el recurso está menos presionado) y/o más severa en la temporada estival, de modo de reservar el recurso para usos zafrales. Esto flexibilizaría la autorización fuera de temporada, por un lado, y, por el otro, obligaría a contar con otra fuente de respaldo (reservorio, embalse, agua subterránea) para abastecer la industria durante el verano.
- Pozos: Una consideración adicional que se podría tomar en la política de asignación de usos es la de proteger preventivamente el uso de aguas subterráneas poco profundas para pequeños usuarios que no cuentan con otras fuentes de agua ni capacidad de inversión para pozos profundos. Esta política conduciría a exigir a emprendimientos industriales que se desarrollan en el medio rural, como el hidrógeno verde, a tomar agua de capas más profundas.

11 REFERENCIAS

BID (2023). Environmental, Health, Safety, and Social Management of Green Hydrogen in Latin America and the Caribbean: A scoping study.

Decreto N° 368/018 sobre la reglamentación de caudales ambientales en Uruguay. <https://www.impo.com.uy/bases/decretos/368-2018>.

EUROWATER (2022). Water treatment for green hydrogen: what you need to know. <https://hydrogentechworld.com/water-treatment-for-green-hydrogen-what-you-need-to-know>

IBM (2021). Requisitos y especificación del sistema de refrigeración de agua. <https://www.ibm.com/docs/es/power8?topic=cooling-water-system-specification-requirements>

International PtX Hub (2023). Disponibilidad del recurso hídrico en el desarrollo del hidrógeno verde y sus derivados en Chile

IRENA (2020). Green hydrogen cost reduction.

IRENA (2023). Water for hydrogen production, International Renewable Energy Agency, BlueRisk, Abu Dhabi, United Arab Emirates.

MIEM (2023). Hoja de ruta del hidrógeno verde y derivados en Uruguay.

MVOTMA-DINAGUA-IMFIA (2011). “Manual de Diseño y Construcción de Pequeñas Presas”, Uruguay. <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/comunicacion/publicaciones/manual-diseno-construccion-pequenas-presas>.

MVOTMA (2017). “Plan Nacional de Aguas”, Uruguay. ISBN: 978-9974-658-31-8. <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/politicas-y-gestion/planes/plan-nacional-aguas>

Ouarda B.M.J., Charron C., St-Hilaire A. (2008). Statistical Models and the Estimation of Low Flows. *Canadian Water Resources Journal*, **33**(2), 195–206. <https://doi.org/10.4296/cwrj3302195>.

Smakhtin V.U. (2001). Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*, **240**, 147-186. ISSN 0022-1694. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00340-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00340-1).

Tallaksen L.M., Madsen H., Clausen B. (1997). On the definition and modelling of streamflow drought duration and deficit volume. *Hydrological Sciences Journal*, **42**(1), 15–33. <https://doi.org/10.1080/02626669709492003>.

Yevjevich V. (1967). An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. Colorado State University, Fort Collins, Hydrology Paper 23, 18 pp.

ANEXO I: OFERTA MINIMA CORRESPONDIENTE AL CAUDAL MINIMO

A los efectos de mostrar el impacto de los proyectos de H2V en las condiciones más extremas según la información disponible, en esta sección se presentan los resultados obtenidos considerando como “oferta mínima” el escurrimiento mínimo en cada subcuenca Nivel 2 en el periodo 1980-2023.

En la Figura 40 se muestran los mapas de estrés hídrico obtenidos a partir de la demanda máxima y la oferta mínima para todo el año (paneles izquierdos) y el cuatrimestre Dic-Mar (paneles derechos): (i) en la situación actual (fila superior), (ii) agregando un proyecto de H2V de escala mediana a la demanda actual (fila intermedia), (iii) agregando un proyecto de H2V de escala grande a la demanda actual (fila inferior).

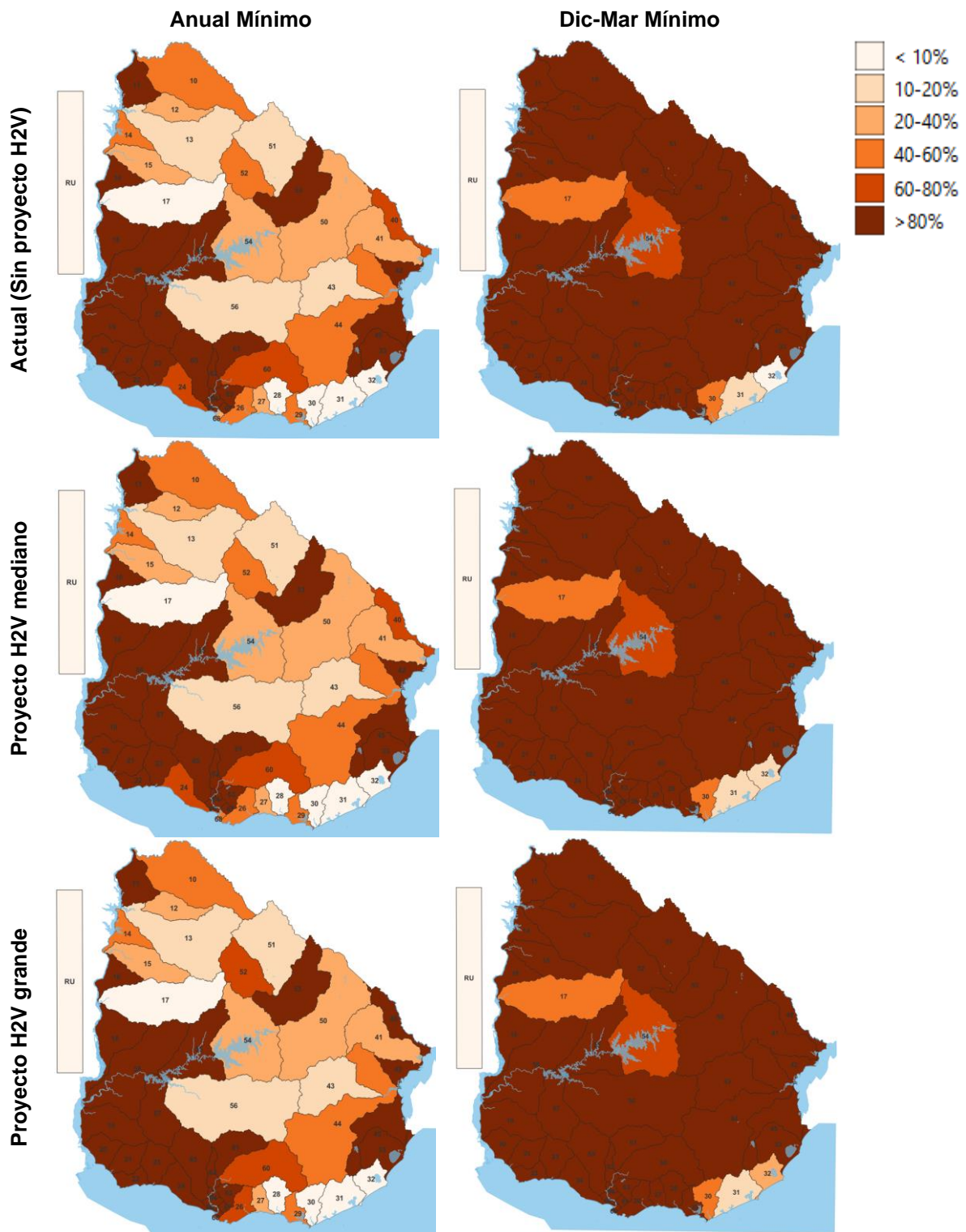


Figura 40: Mapas de estrés hídrico obtenidos a partir de la demanda máxima y la oferta mínima para todo el año (paneles izquierdos) y el cuatrimestre Dic-Mar (paneles derechos).

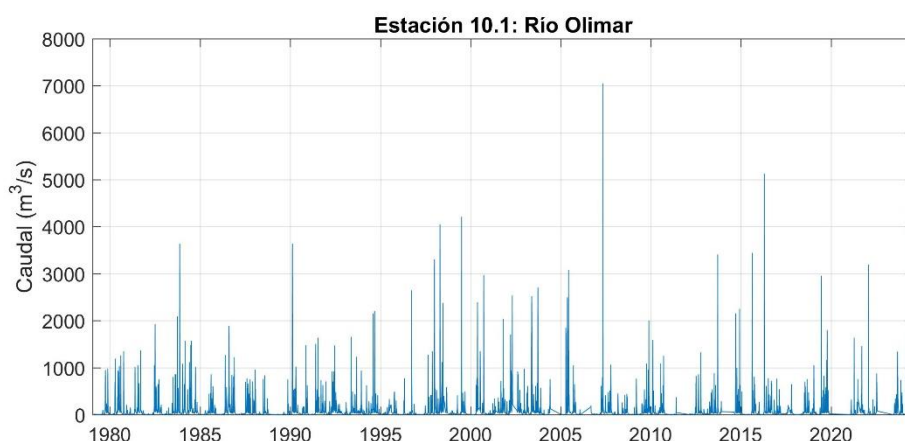
ANEXO II: ANÁLISIS EXPLORATORIO DE LAS SERIES DE CAUDALES DIARIOS

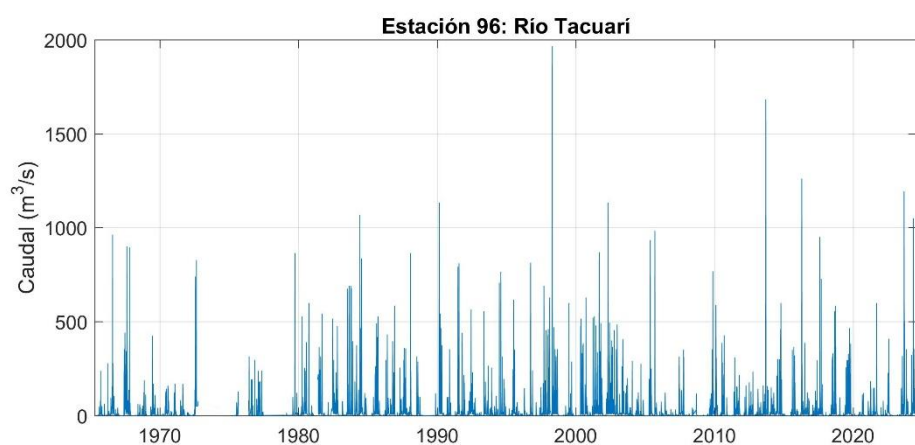
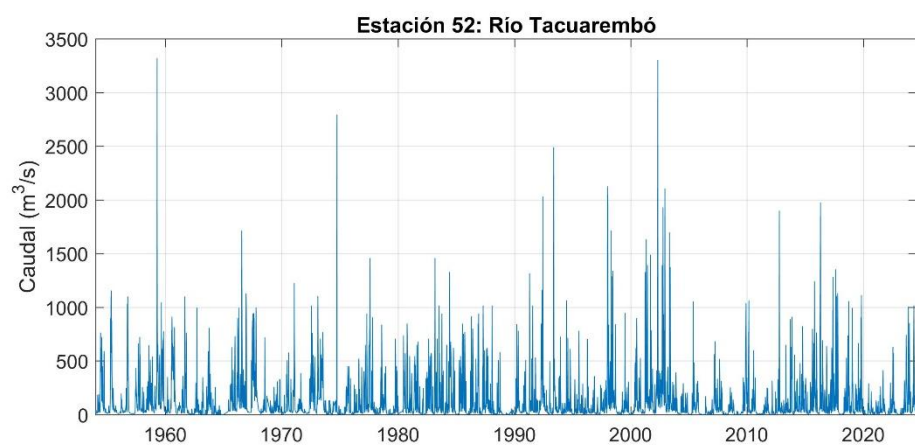
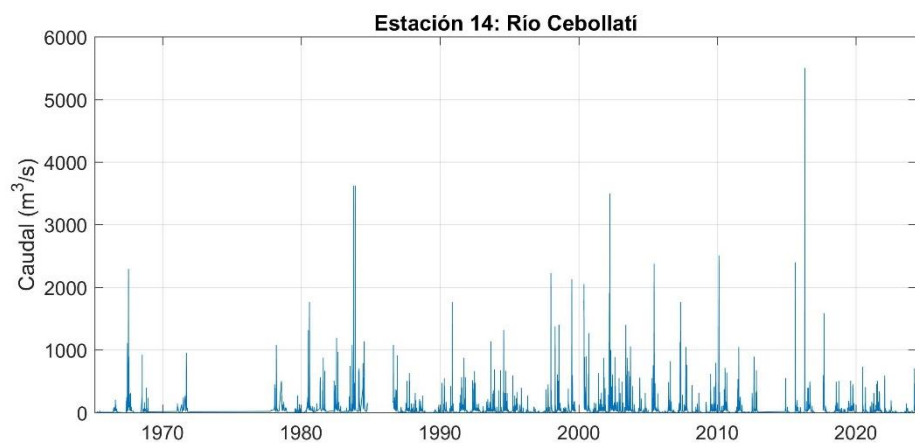
En la Tabla 7 se presenta la fecha de inicio y fin del periodo disponible para cada estación seleccionada, así como el porcentaje de datos faltantes en el periodo de estudio (1994-2023).

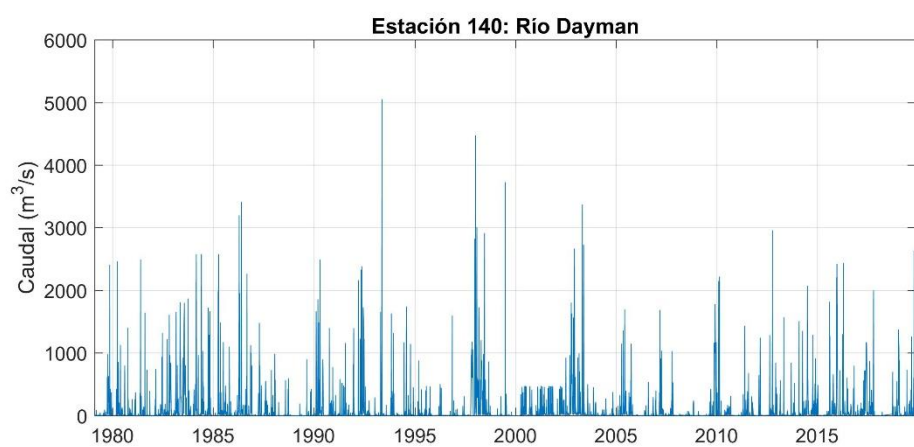
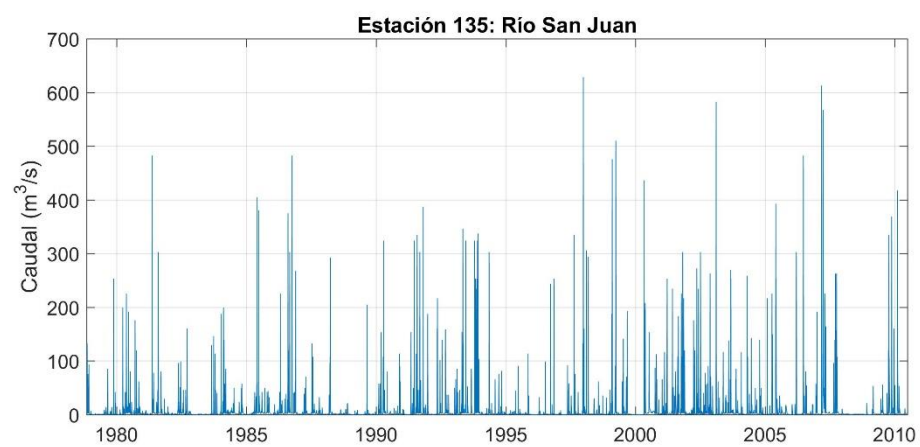
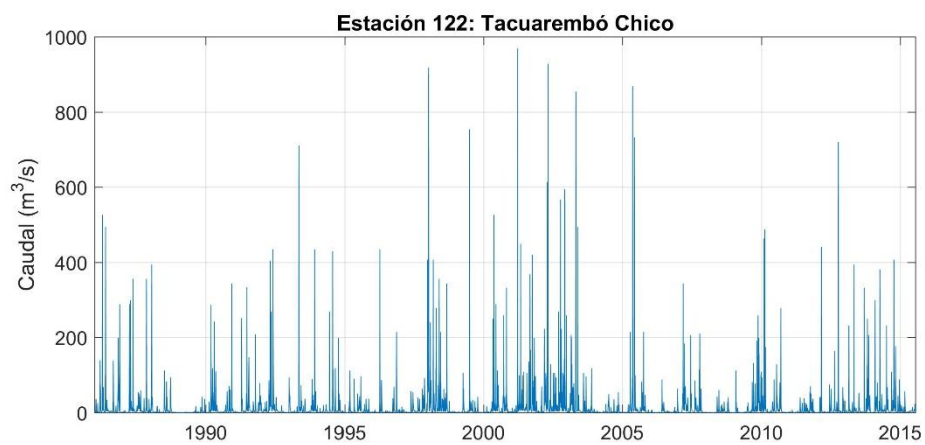
Tabla 7: Periodo de registro y datos faltantes para cada estación seleccionada.

Estación	Curso de agua	Inicio	Fin	Datos faltantes (1994-2023)
10.1	Río Olimar	1979	2024	21%
14	Río Cebollatí	1965	2024	15%
52	Río Tacuarembó	1954	2024	1%
96	Río Tacuarí	1965	2024	2%
122	Tacuarembó Chico	1986	2015	1%
135	Río San Juan	1978	2010	1%
140	Río Dayman	1979	2019	3%
141	Río Queguay	1970	2023	16%
171	Río Arapey	1987	2017	27%
Palmar	Río Negro	1994	2023	0%

A continuación, se presenta la serie temporal de los caudales diarios en el periodo disponible para cada estación seleccionada.







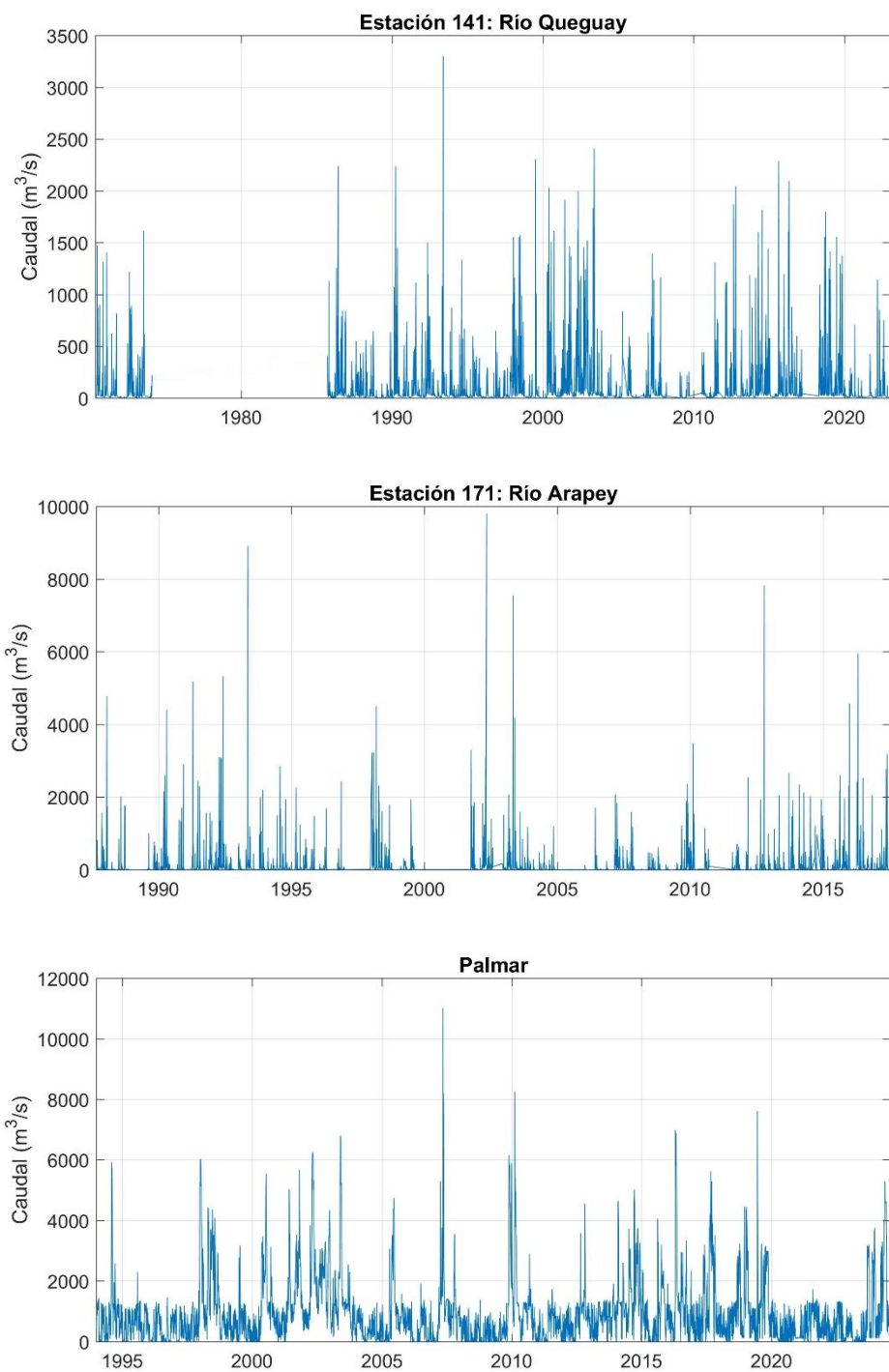


Figura 41: Evolución de los caudales diarios en el periodo disponible para cada estación seleccionada.

ANEXO III: ESTIMACIÓN DE CAUDALES AMBIENTALES

Según la determinación provisoria del decreto sobre la reglamentación de caudales ambientales en Uruguay (Decreto 368/018, Artículo 5), para las tomas de agua en cursos de agua superficiales y permanentes se determinará un caudal ambiental *para cada mes del año*, en base a una estadística hidrológica de al menos 20 años de observaciones, correspondiente al *caudal con 80% de probabilidad de excedencia* (q80) en el mes correspondiente. Cuando, para un curso de agua superficial determinado, no exista la estadística hidrológica referida, el caudal ambiental se calculará utilizando un modelo de balance hídrico de precipitación-escorrentía.

Se exceptúan de la aplicación de dicho decreto los embalses que se encuentren en operación a la fecha de aprobación del mismo, que estuvieran destinados al abastecimiento de agua potable y a la generación de energía eléctrica para el servicio público de electricidad, los cuales serán objeto de reglamentación específica (Artículo 17). Por lo tanto, Palmar y las demás centrales hidroeléctricas quedan excluidas de su aplicación.

En la Tabla 8 se presentan los resultados obtenidos (para cada mes) para cada estación hidrométrica considerando el periodo 1994-2023. A modo de referencia, se incluye también la estimación del caudal ambiental para todo el año. Para facilitar la visualización, se empleó una escala de colores: los colores azules (rojos) indican mayores (menores) caudales.

Tabla 8: Estimación del caudal ambiental (q80) para cada estación seleccionada (expresado en m³/s).

Est.	Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
122 (Tbo. Chico)	0,79	0,43	0,50	0,49	0,58	0,68	1,37	1,92	1,41	1,49	1,49	0,98	0,45
135 (San Juan)	0,61	0,17	0,19	0,34	0,56	0,75	0,96	1,04	0,96	0,91	0,96	0,51	0,28
96 (Tacuarí)	0,89	0,30	0,73	0,52	0,24	0,36	1,49	3,17	3,80	4,02	2,87	0,73	0,30
14 (Cebollati)	3,91	1,36	1,30	1,36	2,16	3,04	7,01	22,22	15,73	19,07	9,62	5,68	2,08
140 (Dayman)	3,33	2,08	2,58	2,32	2,58	4,43	6,29	5,30	4,43	3,85	4,23	3,85	2,58
10,1 (Olimar)	6,18	3,86	4,06	3,72	4,26	5,06	7,18	21,85	25,90	28,09	18,47	11,05	5,50
52 (Tacuarembó)	5,44	1,53	1,53	2,51	2,50	4,13	18,46	29,97	27,27	33,79	26,06	14,10	2,51
171 (Arapey)	5,84	3,00	2,96	3,56	5,84	6,18	9,14	13,69	6,53	7,27	6,39	6,89	3,93
141 (Queguay)	9,88	5,60	7,86	7,45	7,25	11,14	15,65	20,79	19,14	19,74	14,38	12,49	6,48

ANEXO IV: AJUSTE A-V PARA EMBALSES

En base al listado de aprovechamientos registrados en la DINAGUA al 2019⁴, se ajustó una curva que relaciona el área inundada y el volumen almacenado por cada embalse (curva A-V). Dicha relación se emplea en la resolución del balance hídrico de paso mensual.

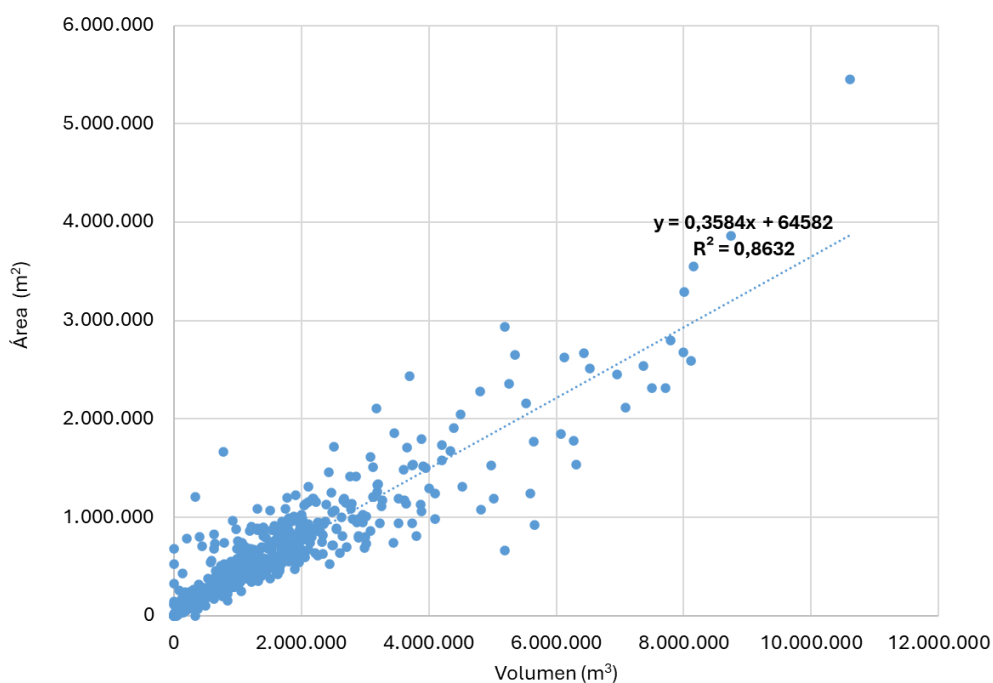


Figura 42: Curva A-V ajustada a partir de los embalses registrados al 2019.

⁴ Disponible en: <https://catalogodatos.gub.uy/dataset/ambiente-dinagua-aprovechamientos-de-los-recursos-hidricos-vigentes-2019>.