

Análisis hidrológico de usos del agua en la Cuenca del Santa Lucía en relación con usos del suelo

Sociedad de Productores Forestales
Comisión de Cuenca del Río Santa Lucía

Agosto 2026

Introducción

- La acumulación de investigaciones hidrológicas en macro y microcuencas en Uruguay brinda un marco cuantitativo robusto sobre la respuesta de los caudales ante cambios en la cobertura del suelo.
- Este trabajo analiza usos del agua típicos en la cuenca del Santa Lucía -donde en todos los usos necesariamente media almacenamiento- evaluando la seguridad de suministro desde la evidencia hidrológica.
- Se sustenta exclusivamente en registros oficiales y literatura científica de carácter público, permitiendo la replicación y facilitando su contrastación desde la ciencia hidrológica.

Metodología

- Se analizan usos de agua para consumo humano:
 - Agua potable: Área Metropolitana y Minas. Casupá (EIA 2017).
- Se usó como referencia de uso de suelo, estudios de macro y microcuencas, Alonso, Silveira et al. (2016, 2021, 2024).
- A partir de series históricas de aportes de varias décadas, se ejecutan balances hídricos continuos para evaluar la seguridad de suministro, detallando eventos secos extremos.
- En cada caso se simulieron escenarios en ambos sentidos: incrementos de área forestada hasta los máximos esperables, que exceden lo hoy forestado, y asumir que no hay área plantada donde hoy existen plantaciones.

Metodología

- Se emplearon registros de caudal aforado, completando faltantes por correlación hidrológica con estaciones vecinas, priorizando el dato medido de caudal sobre series sintéticas de precipitación-escorrentía.
- Se operó a paso temporal diario continuo, adoptando paso mensual en balances preexistentes reanalizados, integrando la evaporación directa en embalses, evaluando el almacenamiento neto.
- Los balances se validaron contrastando los resultados con volúmenes y niveles observados, según disponibilidad de registros.
- Modelación y procesamiento hidrológico computacional implementado mediante scripts de balance de masa continuo.

Metodología

- Se consideraron los efectos por cambio de uso del suelo discriminando los mismos en estiajes y caudales mayores.
- Sólo se analizó el cambio de uso forestal, excluyendo por ejemplo el uso agrícola donde los estudios reportan aumento de escurrimiento.
- Se eligieron ejemplos de uso de agua que dentro del alcance de esta primera evaluación, contaran con información disponible adecuada y fueran representativos de los usos mas relevantes la cuenca.
- Hay espacio para avanzar en casos no considerados en este trabajo de distintos usos y escalas.
- En cualquier caso se entiende que los casos seleccionados permiten extraer conclusiones de utilidad para la gestión de la cuenca.

Consideraciones preliminares

Referencias históricas de uso de suelo, Cambio Climático y aspectos específicos de la cuenca del río Santa Lucía.

¿Cuál es la línea de base de la escorrentía?

¿El escenario prehispánico o los campos ganaderos contemporáneos?

El paisaje prehispánico del Cerro

Traducido de 'Landscape Research' DOI <http://dx.doi.org/10.1080/01426397.2015.1077209>

El paisaje prehispánico del Cerro de Montevideo (Uruguay) en el siglo XVI: Primer Estudio Eco-histórico Basado en Biogeografía de Vegetación y Arácnidos, Historiografía y otras evidencias.

Martín Rodríguez-Pontes^{a,c*}, Fernando G. Costa^a, Fernando Pérez-Miles^{a,b} & Carlos A. Toscano-Gadea^a

^aInstituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable, Uruguay; ^bFacultad de Ciencias, Universidad de la República, Uruguay ^cCERP Centro, Florida, Uruguay.

CONTACTO Martín Rodríguez-Pontes martinangel2@gmail.com

Correspondencia Dirección: Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable. Laboratorio de Etología, Ecología y Evolución, Avenida Italia 3318 CP 11600, Montevideo, Uruguay.

**Indicios de
menor
escorrenría**



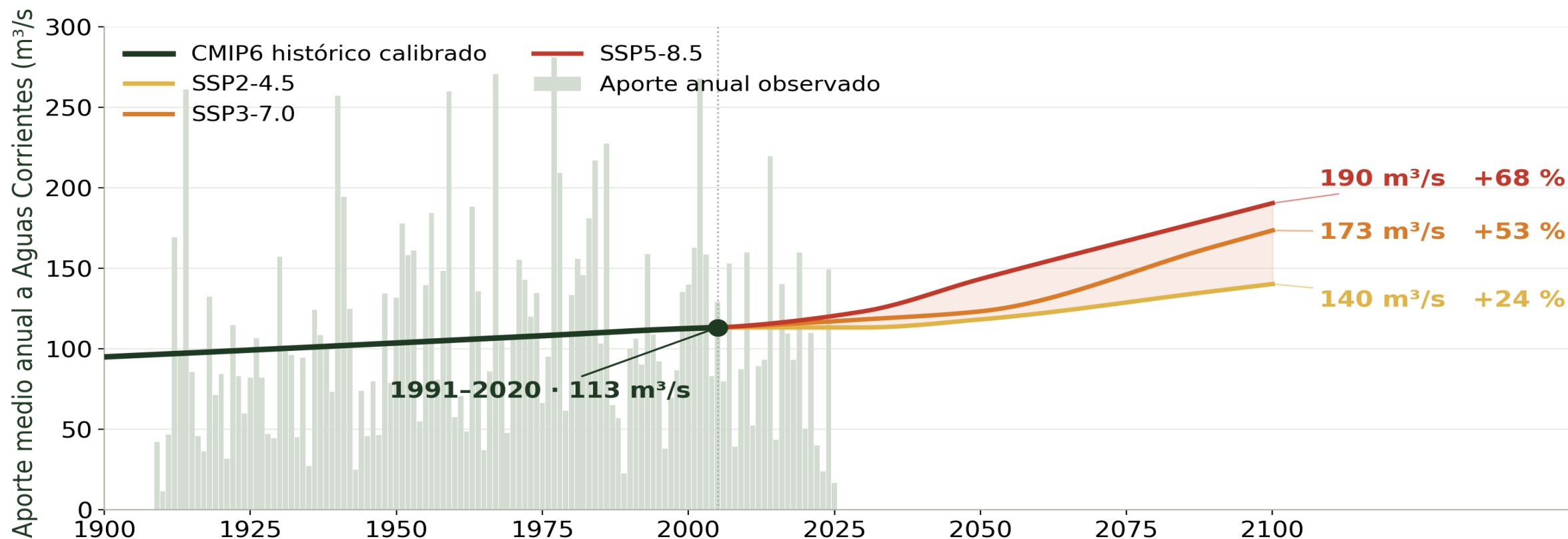
Escenarios de Cambio Climático

A tener presentes más allá que este estudio prioriza el registro histórico de series largas de caudal.

Tendencias de escorrentía (runoff)

Fuente	Copernicus Interactive Climate Atlas · atlas.climate.copernicus.eu/atlas
Variable	Mean of daily accumulated runoff · media anual · mm/día
Modelos	CMIP6 · media multimodelo
Punto de extracción	Lon -55,70 · Lat -34,20 · Fray Marcos, centro de la cuenca
Escenarios	SSP2-4.5 · SSP3-7.0 · SSP5-8.5
Horizontes	Cercano 2021-2040 · Medio 2041-2060 · Lejano 2081-2100
Calibración	Históricos de CMIP6 1850-1900, 1961-1990, 1986-2005, 1981-2010, 1995-2014, 1991-2020

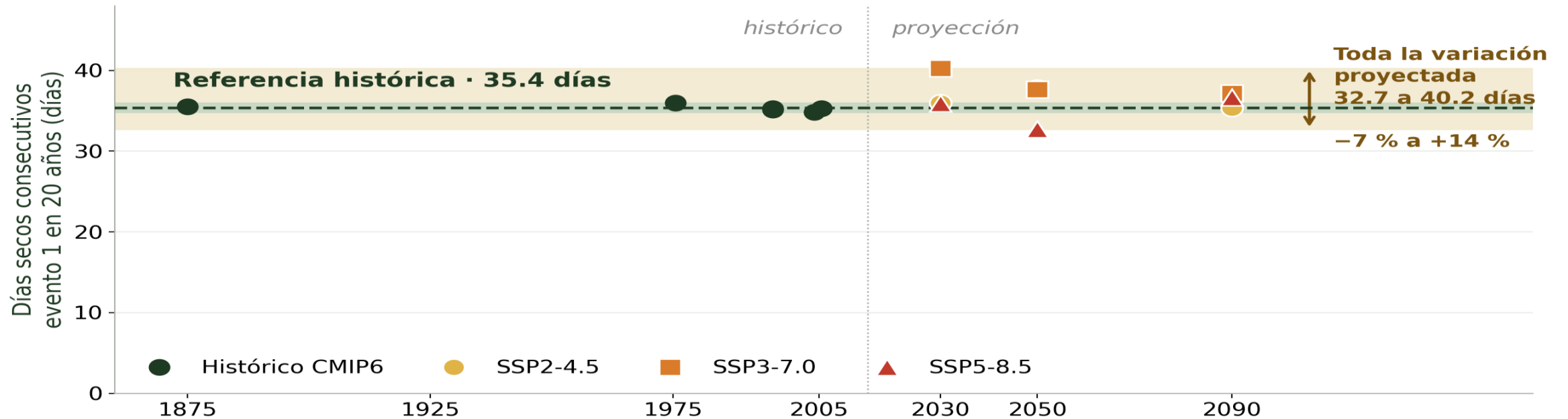
Tendencias en escorrentía (runoff)



Tendencias de escorrentía anual proyectada para la cuenca del Santa Lucía.

Tendencias en días secos consecutivos (CDD)

Consecutive dry days · Annual · Extreme (1-in-20-year) annual event · CMIP6 · Bias adjustment: None · Lon -55,59 Lat -34,09



170 años sin cambio

El histórico varía 1,1 día · 3 %

Toda la variación

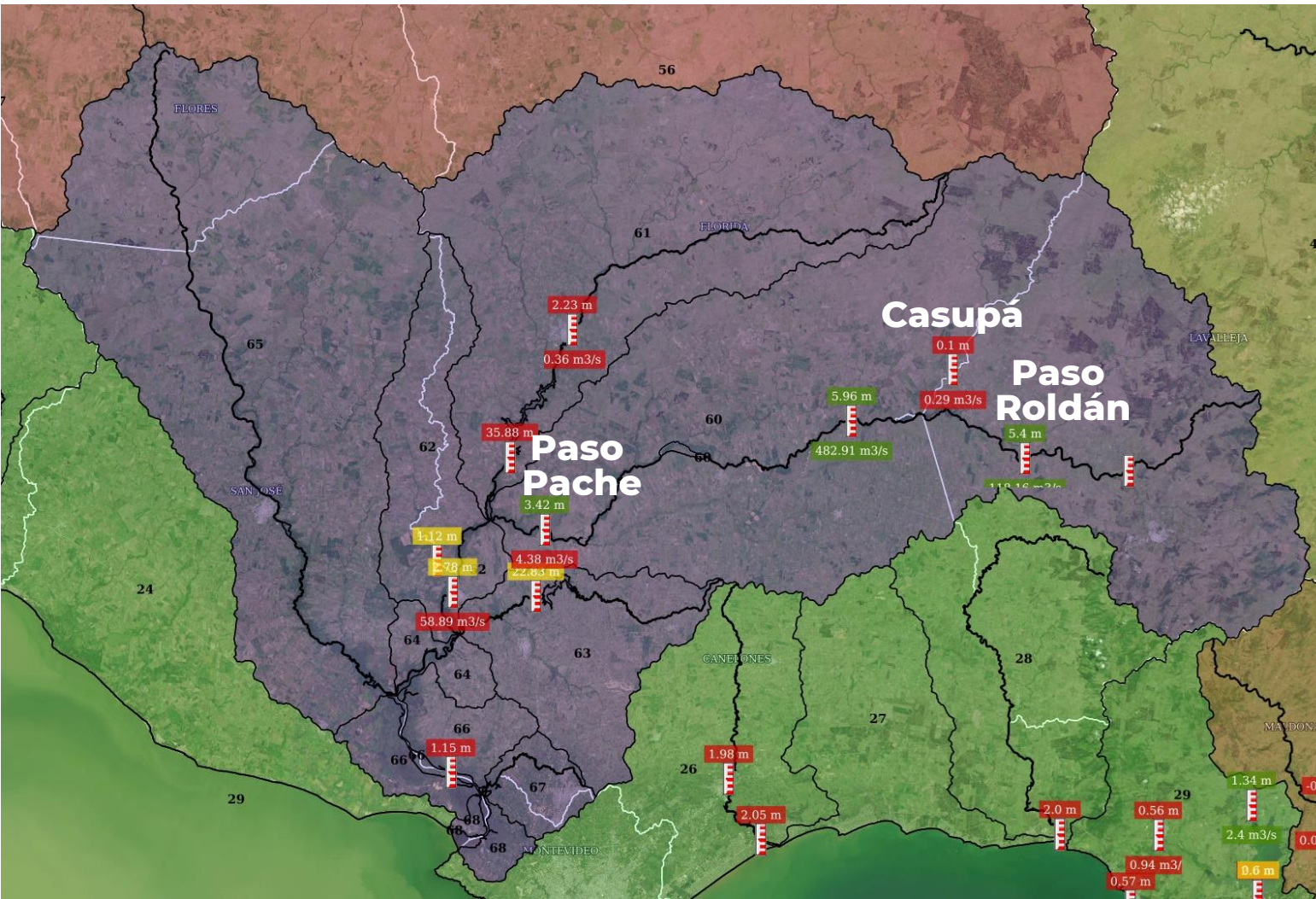
-7 % a +14 % · menos de 5 días

Sin orden con el forzamiento

SSP5-8.5 proyecta menos que SSP3-7.0

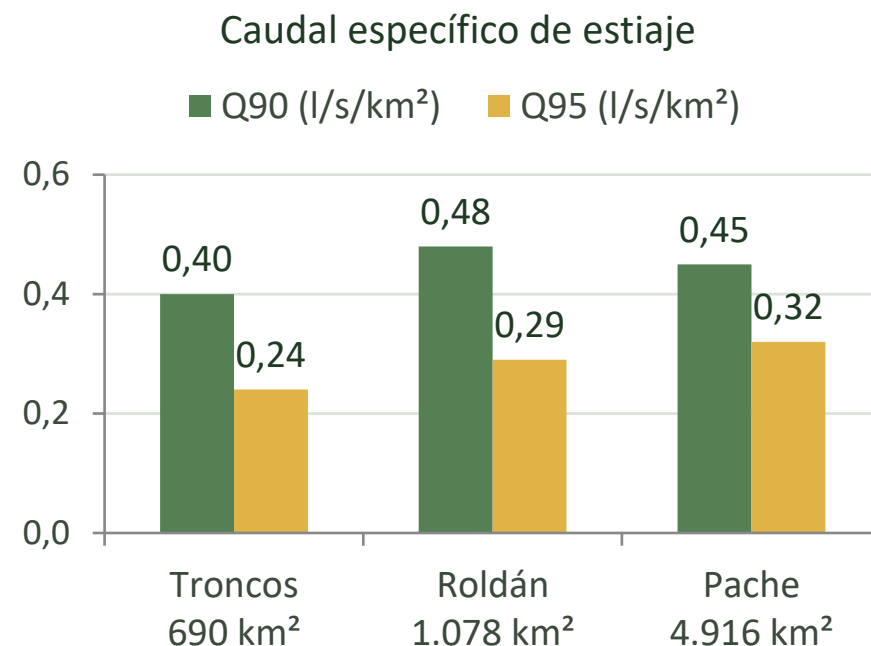
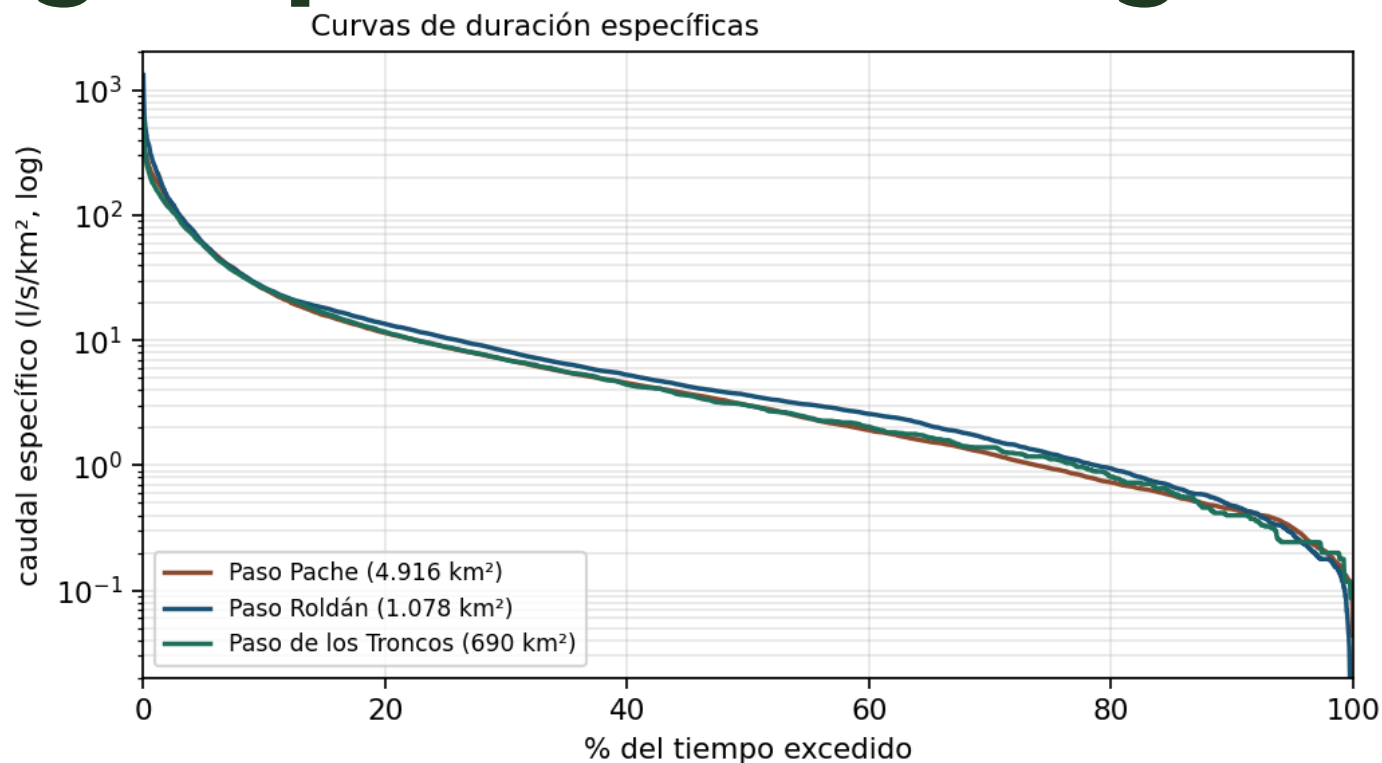
Más allá que el CDD (días consecutivos secos) pueda considerarse un proxy de sequía de corto plazo, la sequía relevante es plurianual y por eso el análisis se hace sobre la serie observada, no sobre este índice.

Caudales en tres cuencas anidadas



- **Paso de los Troncos**
A° Casupá
690 km² | 1970 – 2026
- **Paso Roldán**
Río Santa Lucía
1.078 km² | 1979 – 2026
- **Paso Pache**
Río Santa Lucía
4.916 km² | 1983 – 2023

Igual producción de agua en las tres cuencas

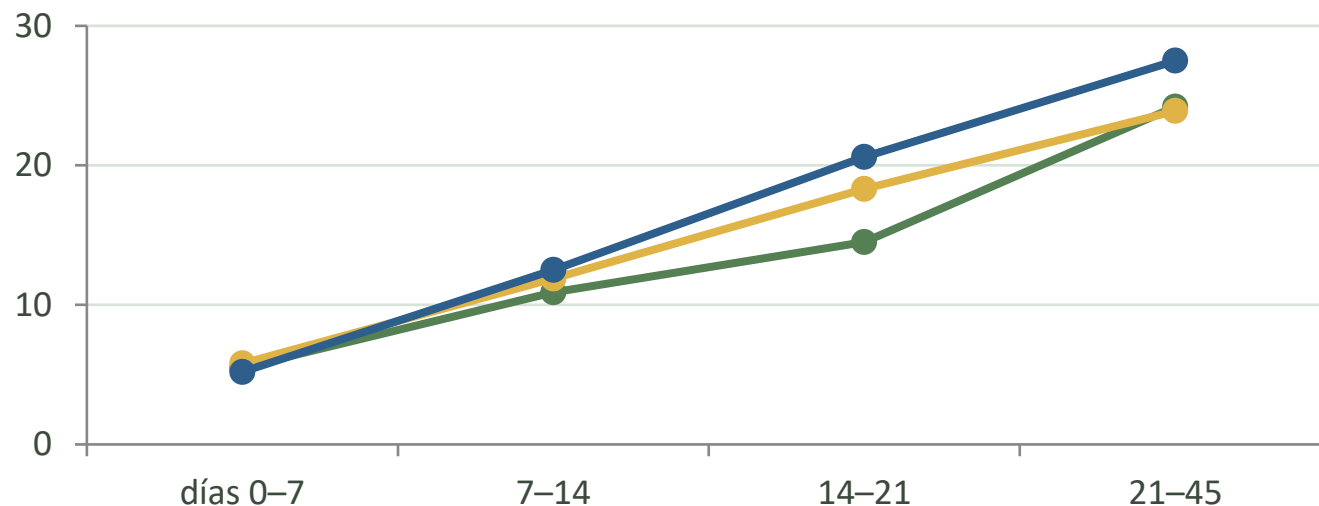


Si el flujo base viniera de nacientes puntuales, el rendimiento caería al crecer el área. No cae. No se observan nacientes con comportamiento diferencial

Las tres cuencas se vacían de manera similar

Constante de vaciado τ , en días, según cuánto lleva sin llover

Troncos Roldán Pache



$\tau = 24 - 28$ días

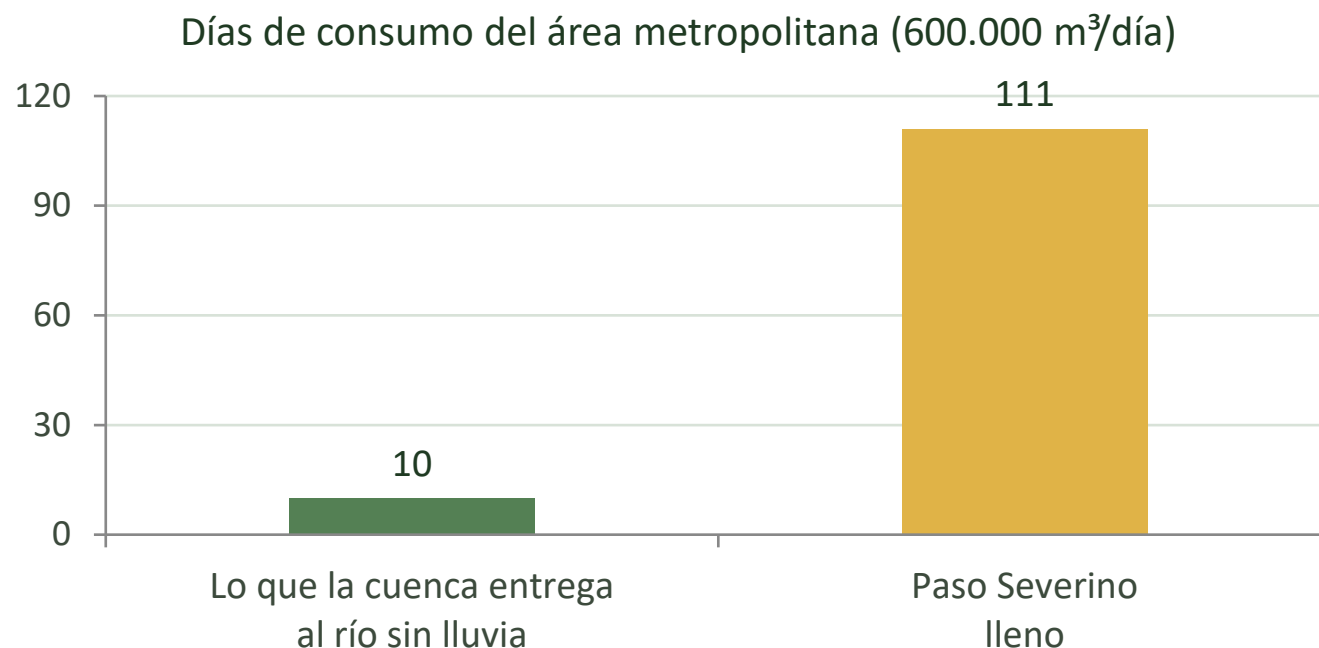
Similar en las tres cuencas

17 días

En que el caudal se reduce a la mitad

La constante de vaciado es la velocidad con que la cuenca se queda sin el agua acumulada: la similitud indica fuerte homogeneidad hidrogeológica entre las cuencas.

El almacenamiento en estiaje



— < 1 mm

Lo que el río drena

— 111 días

Paso Severino lleno

Un milímetro es un aporte marginal: equivale a una llovizna, según se estima de la recesión de los caudales medidos.

Lo que surge de analizar caudales

No hay nacientes privilegiadas

Cada km² de la cuenca aporta prácticamente lo mismo, esté donde esté

La cuenca –y las nacientes- casi no almacenan agua

Menos de 1 mm drenable: dos semanas de consumo

Acciones en cuenca alta no resuelven el estiaje

El faltante es de tasa en estiaje, no de volumen anual

La garantía la dan los embalses

Sólo almacenamiento garantiza el suministro

Estudio de macrocuencas

Alonso, Silveira et. al., 2016, 2021 y 2024

Análisis de macrocuencas

- **Macrocuencas**

Silveira y Alonso (2009) y Alonso et al. (2024) analizaron diez cuencas de 774 a 7.855 km².

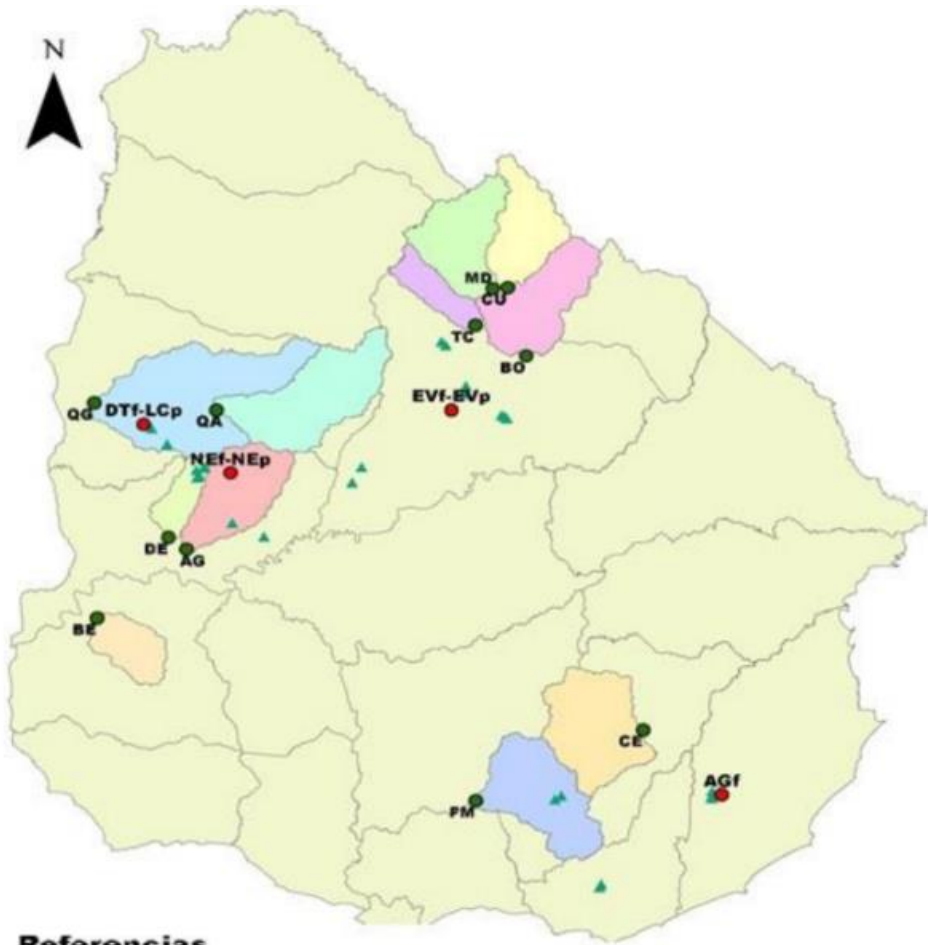
- **Escenarios simulados**

A partir de tres modelos hidrológicos con distinta metodología que permiten separar el efecto climático del uso del suelo.

- **Inferencias**

Los resultados obtenidos permiten una primera aproximación para considerar los efectos de cambios de uso del suelo.

Macrocuencas



Características de las macrocuencas y disponibilidad de datos

Cuenca- Cauce	Área (km ²)	% Forestado al 2018	Agua disponible suelo (mm)	Período de estudio	Datos faltantes de caudal (%)
CU - Aº Cuñapirú	1949	42	146	1980-2020	12.9
BO – Río Tacuarembó	6623	32	118	1975-2020	1.5
MD- Río Tacuarembó	2249	20	115	1975-2020	0.8
TC - Aº Tres Cruces	916	19	117	1981-2010	10.2
DE - Aº Don Esteban	774	16	143	1982-2019	5.6
AG - Aº Grande del Norte	2182	14	89	1988-2019	32.9
CE - Río Cebollatí	2898	9	90	1977-2019	19.3
FM - Río Santa Lucía	2753	9	91	1978-2019	19.3
QG – Río Queguay	7855	8	75	1985-2019	10.0
BE - Aº Bequeló	1646	8	115	1986-2019	12.3

Referencias

- Microcuencas
- ▲ Calidad e Indicadores biológicos
- Macrocuencas

Impacto forestal en los usos del agua en la Cuenca del Santa Lucía

Efectos de la forestación con Eucalyptus en la hidrología de Uruguay



Jimena Alonso
jalonso@fing.edu.uy

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental,
Facultad de Ingeniería, Universidad de la República



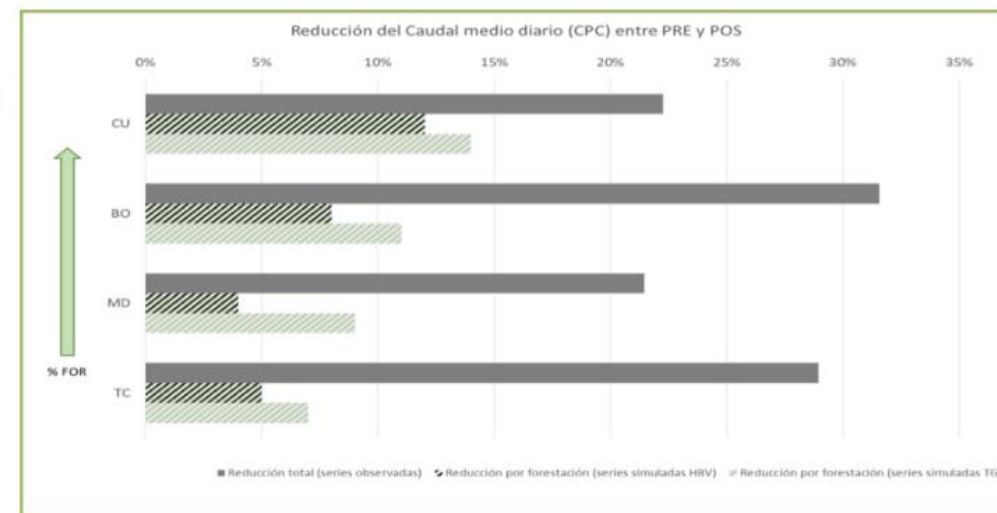
Referencias

- Microcuencas
- ▲ Calidad e Indicadores biológicos
- Macrocuencas

Se trabajó con las 10 subcuencas monitoreadas por DINAGUA con mayor porcentaje de forestación del país (entre 8 y 42%, al 2018)

Se generó una base de datos de precipitación y caudal diarios en el período 1975-2018 (varias comienzan el monitoreo de caudal después)

Se analizó, la variación temporal de la relación entre precipitación y escorrentía, la cual podría deberse a cambios en el uso del suelo (forestación), la demanda atmosférica (evapotranspiración relacionada con la temperatura), o la precipitación. Trabajando con los residuos de los modelos hidrológicos se aislaron los últimos dos efectos.



La modelación hidrológica permite distinguir las variaciones de caudal atribuibles al clima y al cambio del uso del suelo

Cuenca de Fray Marcos (incluyendo Casupá y Minas): La más forestada del Santa Lucía

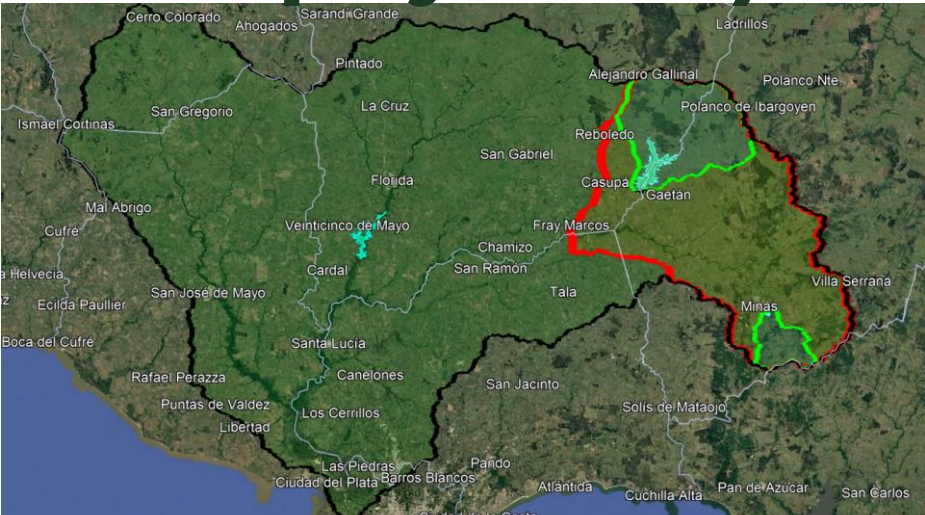
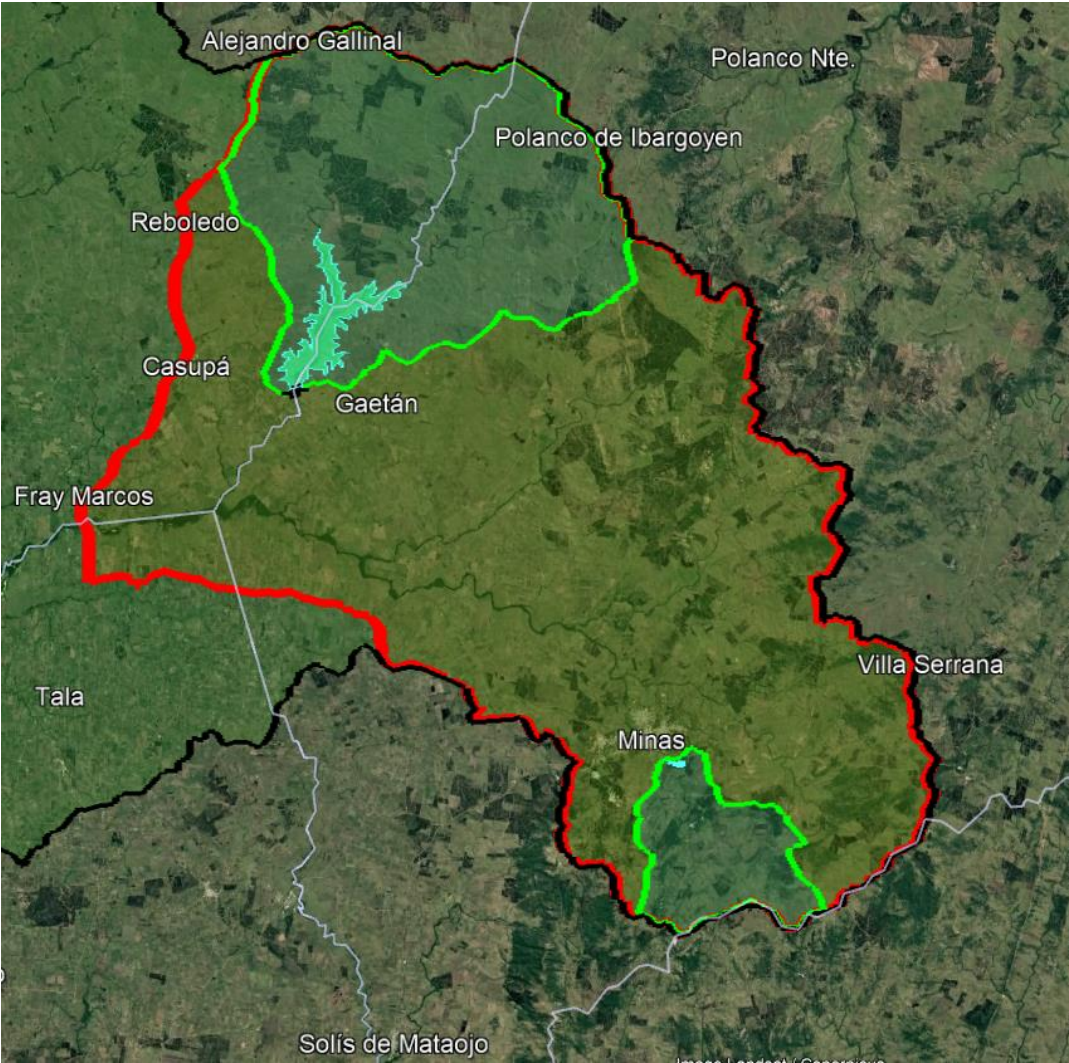


TABLE 6 Large basins: Model performance, trend analysis of the monthly model residuals, and change of streamflow.

Basin ID	Temez model performance BF			Temez model performance AF			Residues trend		Streamflow reduction (% of BF)		
	R ²	NSE	PBIAS	R ²	NSE	PBIAS	MK's tau	Sen's slope	ΔQ _{TOT}	ΔQ _{LULC}	ΔQ _{CLIM}
CU	0.85	0.7	5	0.92	0.81	-16	0.13***	4.70E-04	22	9	13
BO	0.86	0.73	-2	0.91	0.75	-32	0.19***	6.90E-04	32	13	18
MD	0.88	0.75	-10	0.91	0.78	-23	0.08**	3.20E-04	21	6	15
TC	0.89	0.78	-8	0.89	0.75	-26	0.10**	3.20E-04	29	6	23
DE	0.83	0.39	-33	0.89	0.49	-37	0.04				
AG	0.86	0.25	-61	0.75	-0.72	-70	0.11**	0			
CF	0.91	0.82	-13	0.9	0.79	-23	0.08**	1.20E-04	11	3	9
FM	0.89	0.76	-19	0.89	0.71	-30	0.12***	3.80E-04	-11		
QG	0.82	0.59	-30	0.87	0.69	-33	-0.012				
BE	0.79	0.54	-33	0.86	0.73	-19	-0.002				

*p-value <0.1;
p-value <0.01; *p-value <0.001.

Fray Marcos:
“reducción negativa”: el caudal aumentó

Caso en Cuenca de Santa Lucía: Fray Marcos

- **Se incrementa coeficiente de escorrentía pre / post-forestación**
Alonso et al. (2024) reportan una reducción de -11% , o sea un aumento de caudal: lo contrario a las cuencas del norte.
- **Variaciones en distintos usos del suelo:**
La forestación llegó al 9% del área; la agricultura, que aumenta el escurrimiento, pasó del 8 al 16% .
- **Resulta estadísticamente imposible determinar distribución**
Sin poder separar clima, agricultura y forestación, el efecto atribuible al uso del suelo queda indeterminada en esa cuenca.
El clima y todos los usos del suelo, no solo el forestal, deben considerarse para estimar variaciones del escurrimiento.

Microcuencas apareadas

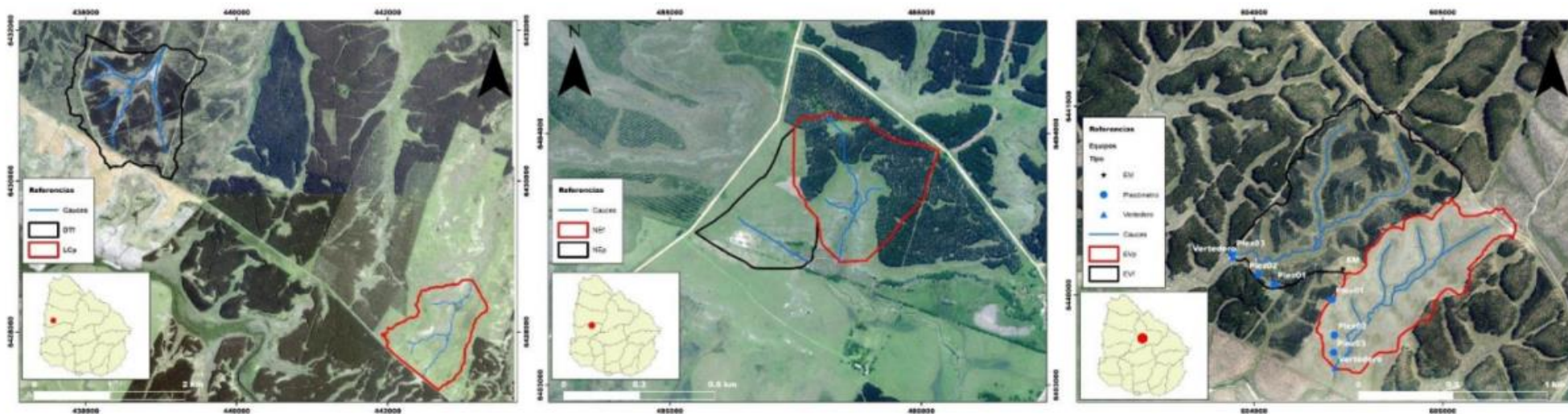
Estudio de microcuencas

Síntesis de tres microcuencas experimentales

Los tres pares de microcuencas

- Don Tomás y La Cantera · Paysandú
DTf de 2,12 km² con 56 % plantado de E. globulus desde 1998, replantado con E. dunnii en 2015. LCp de 1,20 km² de pastura.
- La Nueva Esperanza · Río Negro
NEf de 22 ha con 47 % plantado de E. grandis en 2011, NEp de 12 ha. Calibración de 2008 a 2011.
- El Viraró · Tacuarembó
EVf de 64 ha con 35 ha plantadas (55 %) de E. grandis y dunnii en 2016, EVp de 44 ha. Calibración de 2012 a 2016.

Microcuencas



Cuencas	Don Tomás	La Cantera
	Forestada	Pastura
Área (km ²)	2.12	1.20
Pend. Cauce (%)	0.90	1.58
Pend. Cuenca (%)	4.68	5.92
T. conc. (min)	39.0	36.5
Período monitoreo	desde 2006	

La Nueva Esperanza	
Forestada	Pastura
0.12	0.22g
5.2	4.3
7.2	7.6
9	11
desde 2008	

El Viraró	
Forestada	Pastura
0.4	0.6
1.96	1.66
8.1	6.94
23	29
desde 2011	

Fuentes

- Silveira, L., Gamazo, P., Alonso, J. y Martínez, L. (2016). Effects of afforestation on groundwater recharge and water budgets in the western region of Uruguay. *Hydrological Processes* 30: 3596-3608.
- Alonso, J., Silveira, L. y Vervoort, R. W. (2024). Assessing effects of afforestation on streamflow in Uruguay: from small to large basins. *Hydrological Processes* 38(9): e15272.
- Universidad de la República (2021). Indicadores ambientales multiescala de la forestación en Uruguay. Proyecto ANII-FSI 2016 1-128679. Udelar, diciembre de 2021.

Aguas Corrientes 1947-2026 con detalle en 2022-2023

Modelo calibrado contra el volumen embalsado
y el cloruro medido en la red metropolitana

Tres escenarios de cobertura forestal · Serie 1947–2026

Metodología y fuentes

Balance diario de Paso Severino y Canelón Grande con los aportes medidos por Dinagua y refiriendo a Fray Marcos para iniciarlo en 1947 y completado desde cuenca vecinas. El modelo se calibró contra el volumen embalsado y contra 163 días de cloruro medido en la red en 2023. Se usó como proxy de salinidad el aporte del río Uruguay.

Caudales

DINAGUA · aforos diarios

Embalses y captación

OSE · reservas y orígenes del agua

Cloruros

Intendencia de Montevideo · serie diaria 2023

Simulación aguas abajo

Simulación simplificada de la salinidad del río Santa Lucía aguas debajo de Aguas Corrientes con datos del río Uruguay, Salto Grande · 1909–2026, proxy por disponibilidad (corredor del río Uruguay en el Río de la Plata). A efectos estadísticos que ajusta en 2023.

Efecto forestal

Alonso, Silveira et al. (2021, 2024)

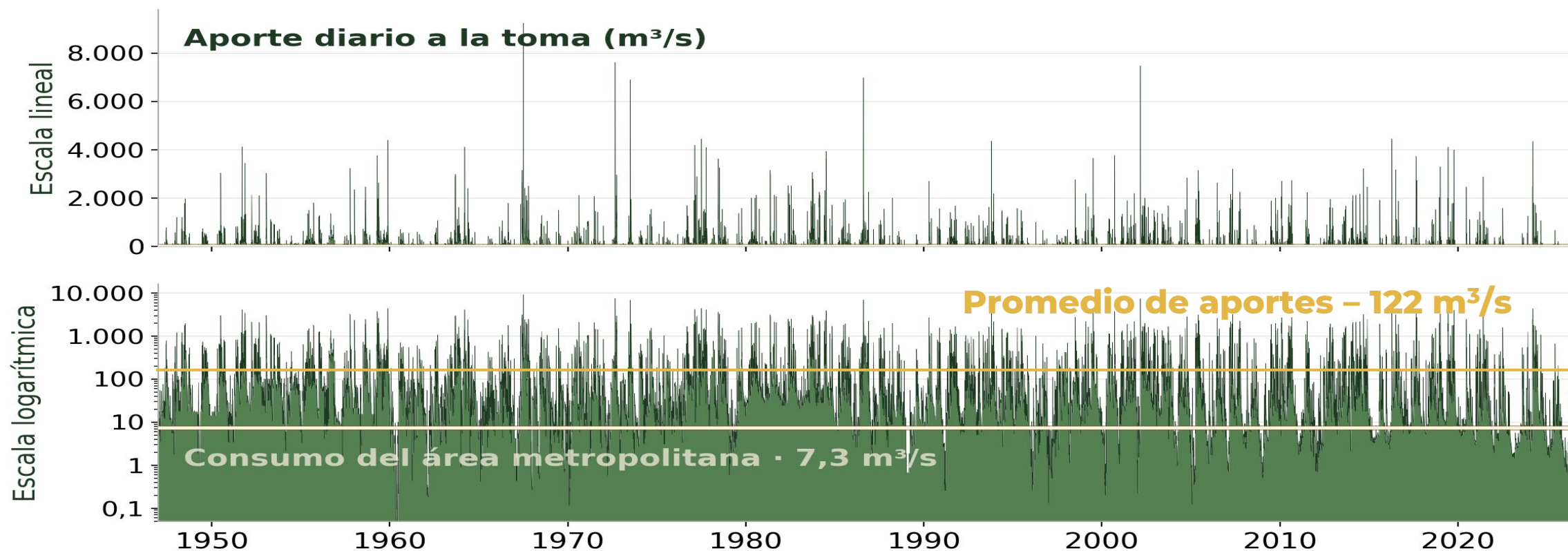
Se capta menos del 10 %, y aun así hay problemas en sequía



Se simuló el caso real, y dos casos teóricos: sin forestación y forestado el 60% de la prioridad forestal.

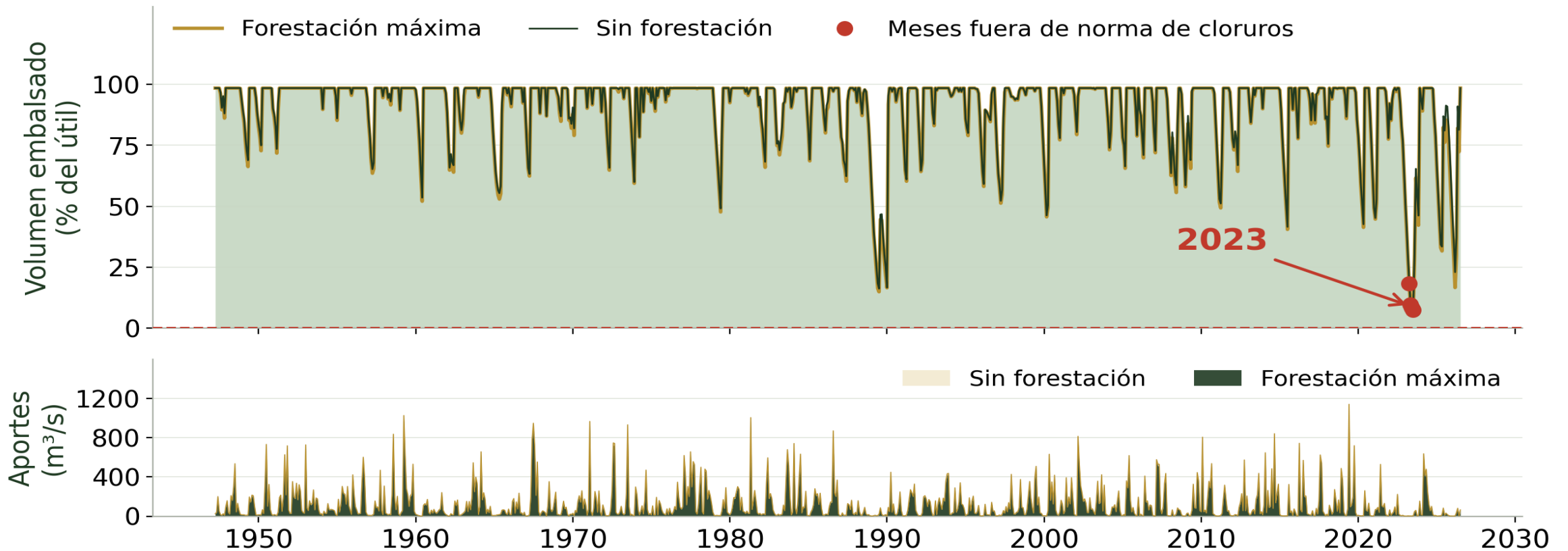
El aporte promedio es 17 veces el consumo

El problema es el estiaje



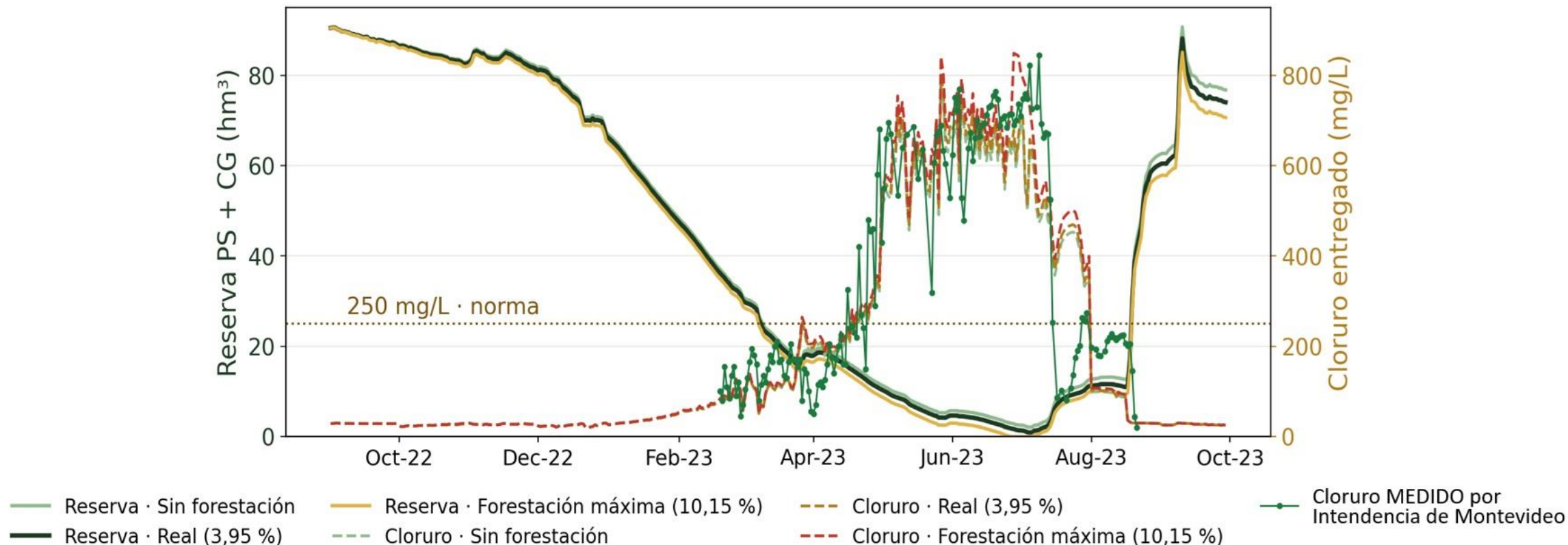
Ochenta años de caudal diario. Reconstruido desde estaciones hidrométricas de la cuenca y faltantes inferidos de cuenca incremental de Palmar, básicamente cuenca del Yi.

Volumen embalsado y aportes, 1947-2026



Un solo evento en 79 años, con y sin forestación: abril a julio de 2023.

El evento de 2023



Días fuera de norma:

104 sin forestación · 105 real · 105 con forestación máxima.

Conclusiones

Mínima diferencia en falla

La diferencia entre escenarios (1 día) es un orden de magnitud menor que el error del propio modelo, es decir, indetectable.

La forestación no define

Incluso en el escenario de forestación máxima el único evento de falla de la serie sigue siendo 2023, con la misma duración.

Lo que define

El clima, la capacidad de almacenamiento y el consumo.

El problema no es el uso del suelo: es almacenar suficiente agua.

El embalse Maggiolo y suministro de agua potable a Minas

Balance hidrológico diario del arroyo San Francisco, 1979–2025

Abastecimiento de agua potable de la ciudad de Minas

Cómo se construyó la serie

- Caudales traspuestos por área desde Paso Roldán
- Calibración con el Protocolo de Sequías OSE–BID
- Uso suelo forestal, Alonso, Silveira et al (2021, 2024)
- Balance diario con evaporación del espejo

Origen de los datos

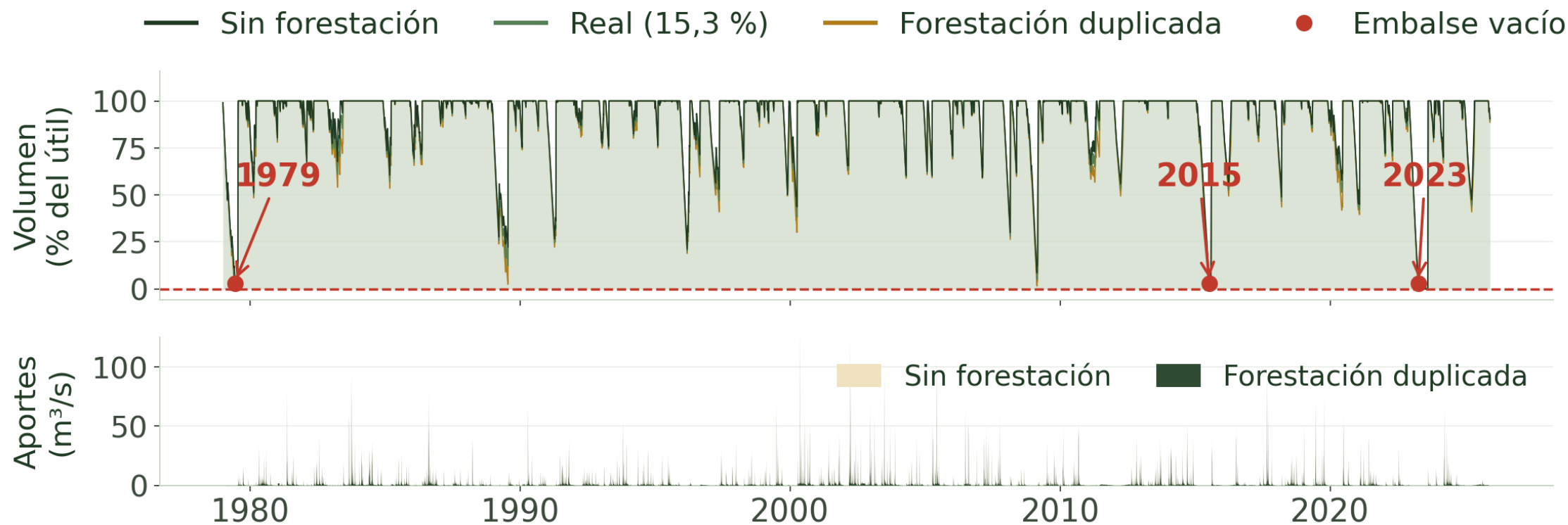
- Caudales diarios: DINAGUA Paso Roldán
- Aportes y demanda: Protocolo OSE–BID, 2025
- Cuenca y forestación: CURE–UdelaR, 2015
- ***No se consideraron otras fuentes que proveen a la ciudad de Minas, lo cual exagera la falla.***

Destino del agua que ingresa al embalse



El caudal extraído no varía: 97,5 l/s en los tres escenarios.
La variación de aportes se traslada aguas abajo con alto caudal.

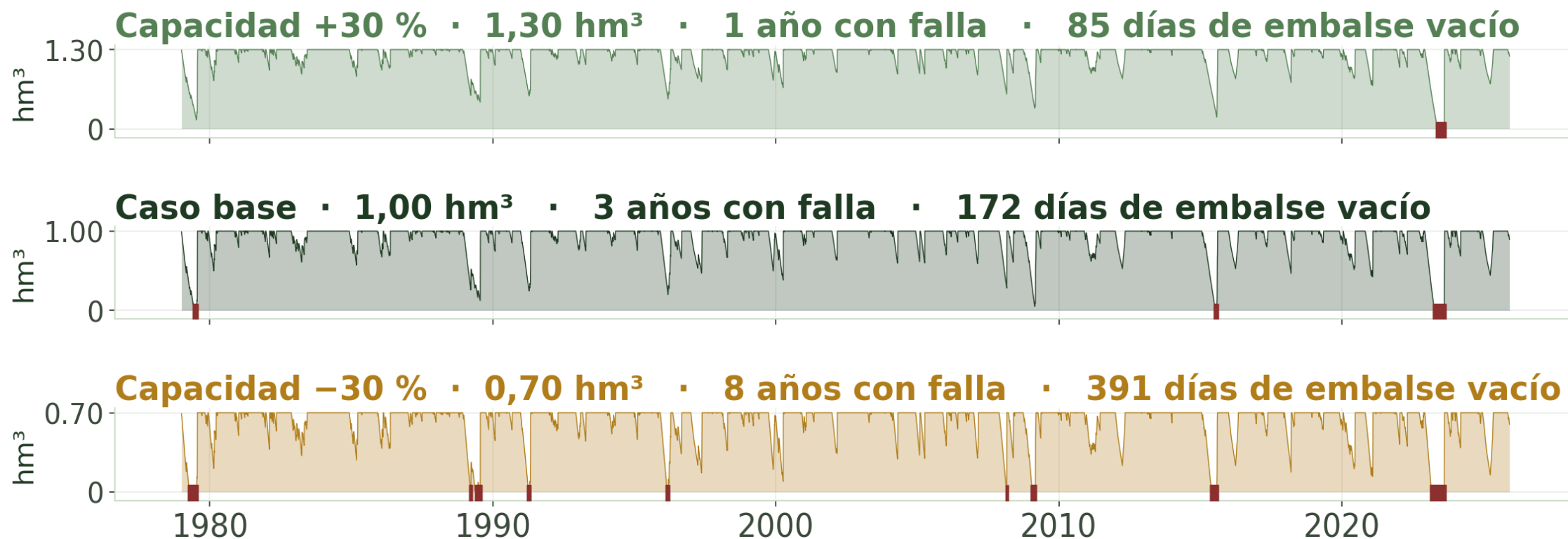
Volumen del embalse y eventos críticos



Tres vaciamientos totales en 47 años.

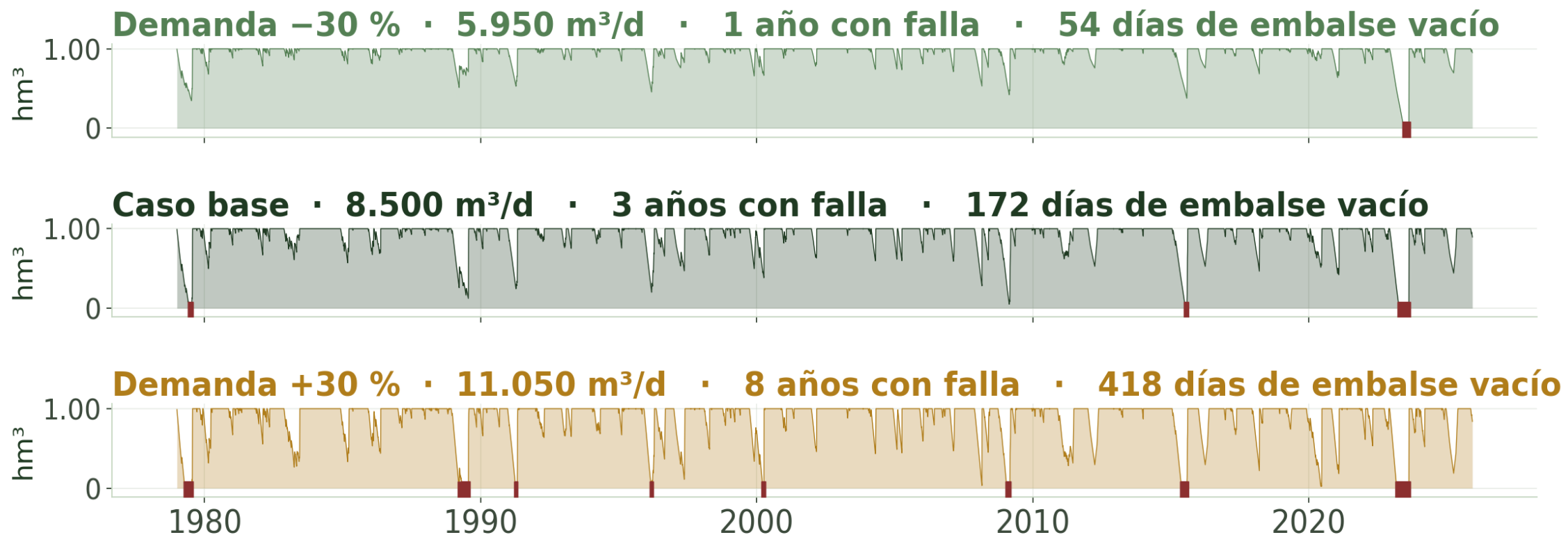
Duplicar la forestación no agrega ningún año de falla.

Sensibilidad a la capacidad del embalse



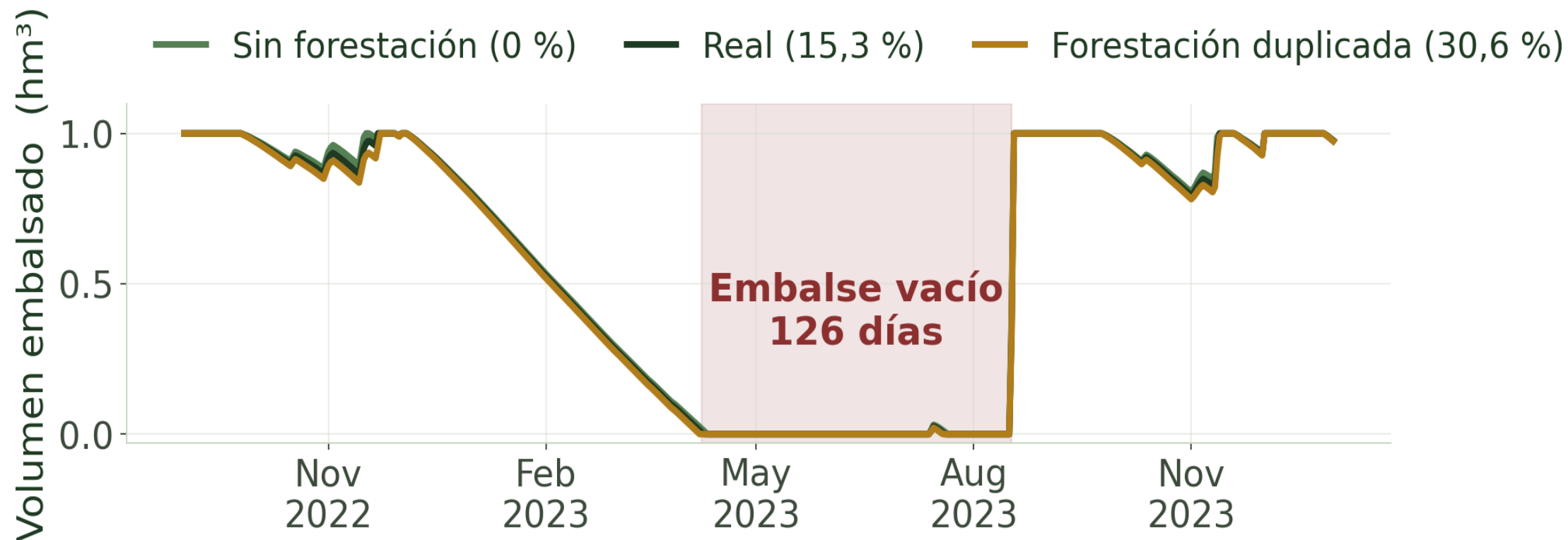
Sumar o restar un 30 % de capacidad lleva la falla de 3 a 8 años en 47.

Sensibilidad a la demanda de abastecimiento



+30% de consumo ó -30 % de embalse: 3 a 8 años de falla
-30% de consumo +30 % de embalse: 3 a 1 año de falla
±30% de forestación no cambia los años de falla.

El evento más crítico: la seca de 2023



Los tres escenarios se vacían con tres días de diferencia.

Decide la capacidad del embalse, no la cobertura de la cuenca.

Nota: la falla está exagerada por no considerarse otras fuentes.

Conclusiones

- 1 El embalse vierte el 94 % de lo que recibe: almacena menos de cuatro meses de consumo.
- 2 La sensibilidad de la seguridad del suministro depende de la serie de caudales considerada y sus eventos extremos, del almacenamiento y del consumo, no del área forestada.
- 3 En la sequía extrema el uso del suelo no altera el resultado: manda la capacidad de embalse y el consumo.

Modelo hidrológico de Casupá

TYPSA 2017 · 480 meses, abr-1976 a mar-2016

Este análisis toma el EIA de TYPSA de 2017 y no apunta a evaluar la solución propuesta para el suministro en el área metropolitana, sino a utilizar el caso expuesto para un análisis de sensibilidad en función de distintos escenarios de uso del suelo forestal en la cuenca.

Metodología, datos y fuentes

- **El modelo de 2017, reconstruido**

480 meses de aportes, volumen y salida (TYP SA). Evaporación, caudal mínimo y curva área-volumen deducidos del residuo.

- **Tres escenarios de área forestal**

0 %, el 13,9 % real de 2017 y el máximo: 60 % de los suelos de prioridad forestal, que son el 58,7 % de la cuenca.

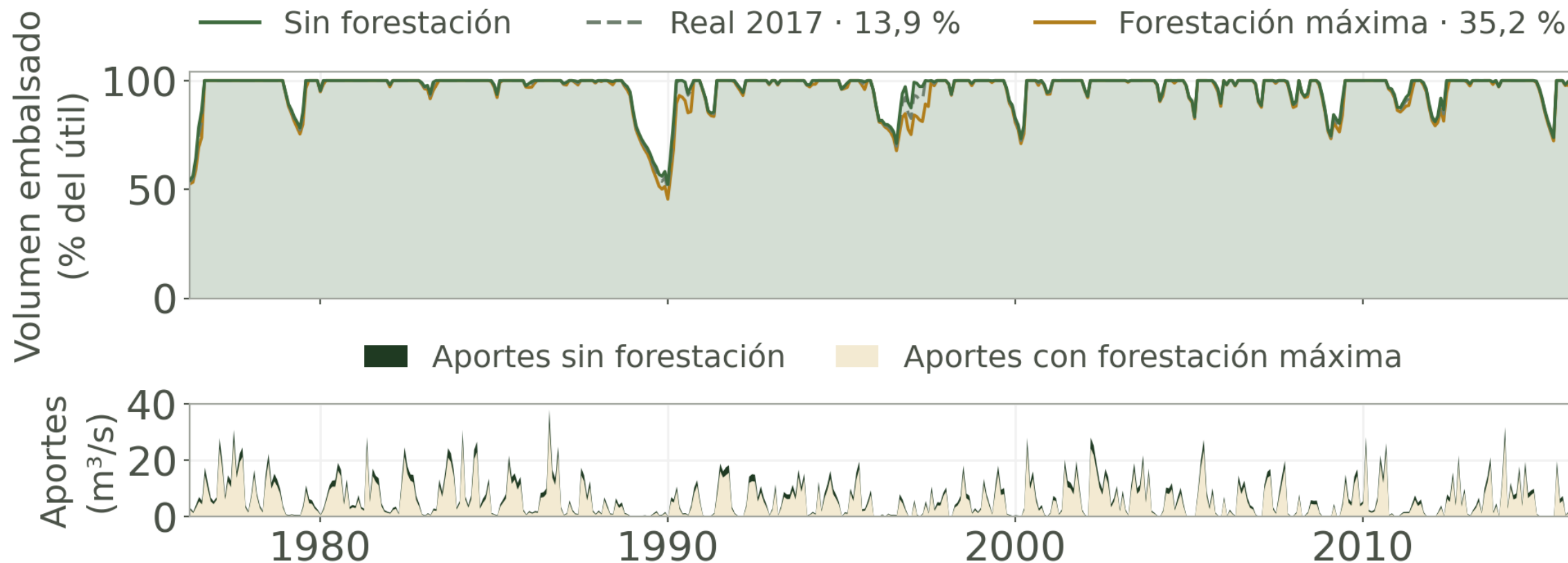
Destino del agua que ingresa al embalse

■ Erogado aguas abajo comprometido ■ Evaporado desde el espejo ■ Continúa hacia aguas abajo



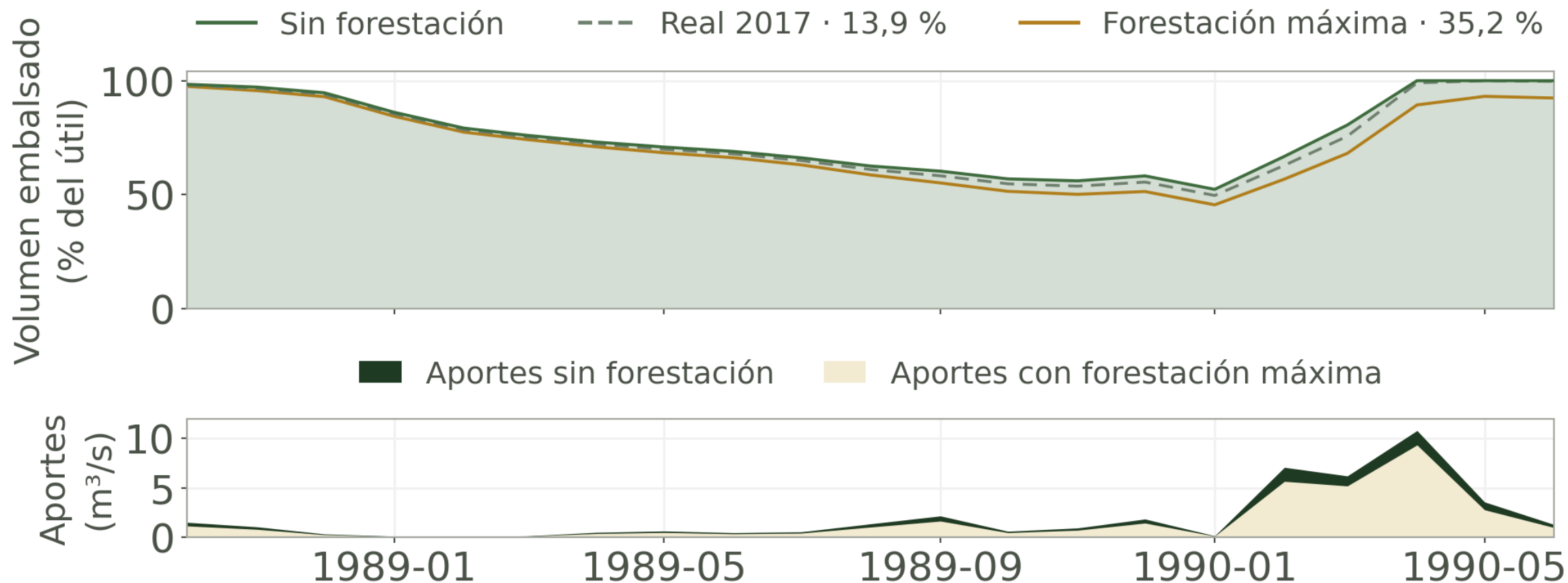
Lo erogado aguas abajo no cambia: la caída sale de los caudales en situación de embalse lleno.

Volumen embalsado y aportes, 1976-2016



Ninguna falla en 40 años simulados, con y sin forestación.

El evento crítico: 1988-1990



Ni en el peor estiaje el embalse baja del 45 % de su volumen útil.

Conclusiones

- En este caso, los cambios en el área forestada no modifican materialmente la seguridad del suministro.
- Maximizando la forestación, la seguridad de suministro no cambia para la serie considerada que incluye eventos severos.
- Define clima, capacidad de embalse y consumo, no el uso del suelo.
- La diferencia entre escenarios se traslada íntegramente hacia aguas abajo en momentos de alto caudal: el erogado comprometido se mantiene idéntico por diseño del ejercicio.

Conclusiones generales

- Dado el clima en Uruguay, su régimen de precipitaciones y sus cuencas, todos los usos del agua requieren almacenamiento.
- Las reservas se reponen con altos caudales, y su variación solo cambia el tiempo llenado. Con bajos caudales, consumo y pérdidas vacían la reserva, que marcan el ritmo del descenso.
- Debe cubrir la peor seca con margen para más extensas. Define el clima (duración de la seca), el almacenamiento y el consumo
- Para los casos y escenarios analizados, los cambios del uso del suelo- incluido el forestal- no alteran la seguridad del suministro.
- De los casos analizados no surge fundamento hidrológico para restricciones genéricas adicionales al desarrollo de plantaciones forestales.

Conclusiones generales

- La herramienta idónea es tratar la dimensión hidrológica en los Estudios de Impacto Ambiental de plantaciones, caso a caso, con estudios específicos.
- La vulnerabilidad en usos de agua en Uruguay no es la disponibilidad anual de agua ni el uso del suelo, sino el déficit de capacidad de almacenamiento e infraestructura de reserva.
- El porcentaje de forestación de una cuenca no resulta un indicador representativo de la vulnerabilidad en el uso del agua.
- Un indicador que refleje esa vulnerabilidad debería medir el porcentaje de usuarios de agua cuyo almacenamiento no logra superar la peor sequía registrada.

Conclusiones generales

- En cuanto al concepto de nacientes, con los suelos de la cuenca, las cabeceras no actúan como reservorios perennes; son cauces de respuesta rápida que en sequías severas reducen al mínimo su aporte. El análisis de caudales de cuencas alta y baja muestra que la producción de agua es uniforme en toda la cuenca.
- Con respecto a la relevancia de los caudales de estiaje, en sistemas que requieren almacenamiento, en sequías extremas el aporte natural es marginal frente a la extracción y pérdidas de las reservas. Eventuales cambios en caudales de estiaje ya marginales no cambian el patrón de vaciado, mientras que el llenado queda determinado por caudales medios y crecidas, que aun reducidos siguen permitiendo una rápida recuperación de las reservas.

Conclusiones generales

- Este análisis, desarrollado desde una perspectiva estrictamente hidrológica, apunta a cuantificar los usos del agua integrando la evidencia empírica disponible sobre usos del suelo en estudios publicados.
- Se estudian tres casos específicos, no siendo objeto de este análisis escalas menores y eventuales efectos entre usos del agua.
- Como toda aproximación de este tipo, el trabajo adopta supuestos metodológicos, inferencias y simplificaciones orientadas a viabilizar el cálculo, sin perder rigor en la representación de los procesos físicos.

Conclusiones generales

- Sobre la base de información pública y verificable, la Sociedad de Productores Forestales pone este trabajo a disposición de la Comisión de Cuenca del Río Santa Lucía como punto de partida para un desarrollo técnico continuo, que contribuya a profundizar el conocimiento de la cuenca del Santa Lucía y sienta bases extrapolables a otras cuencas del país.



Sociedad de
**Productores
Forestales**

Muchas Gracias